

**Е.В. СЕМЕНЕНКО**, д-р техн. наук,

**В.Д. РУБАН, К.К. ПОДОЛЯК**

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

## **ПРЕДЕЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ**

Для отечественной экономики уголь остается основным энергоносителем. Одним из перспективных направлений в угольной энергетике является приготовление, транспортирование и сжигание водоугольных суспензий в теплогенерирующих агрегатах. В связи с этим представляет интерес определение предельной концентрации водоугольных структурированных суспензий которая обеспечивает высокую производительность установки в структурном режиме течения и позволяет сохранить подвижность, текучесть, агрегативную устойчивость, статическую и динамическую седиментационную стабильность суспензии.

Свойства твердой фазы во многом определяют свойства структурированных суспензий. При этом известны несколько классификаций суспензий, которые используют в качестве параметров характеризующих их класс именно параметры частиц твердой фазы (табл. 1, 2) [1, 2]. В других случаях считают, что свойства структурированных суспензий полностью определяются крупностью твердых частиц и их зольностью [3-7].

*Таблица 1*

Классификация пульп по концентрации [1]

Наименование суспензий	Объемная концентрация, %
Низкой концентрации	от 0 до 10
Средней концентрации	от 10 до 30
Высокой концентрации	от 30 до 64

*Таблица 2*

Классификация структурированных суспензий на основе углей [2, 8]

Наименование параметра	Диапазон изменения параметра	Тип структурированной суспензии
Максимальная крупность частиц в суспензии, мм	менее 0,01	Ультратонкие
	от 0,01 до 0,5	Тонкодисперсные
	от 0,5 до 13	Грубодисперсные
	более 13	Угольные пульпы
Массовая доля твердой фазы в суспензии, %	менее 45	Низкоконцентрированные
	от 45 до 55	Среднеконцентрированные
	от 55 до 75	Высококонцентрированные
	более 75	Угольные пасты
Зольность угля в суспензии, %	менее 1	Ультрачистые
	от 1 до 8	Малозольные
	от 8 до 20	Среднезольные
	от 20 до 70	Высокозольные
	более 70	Отходы

## **Загальні питання технології збагачення**

Классификация табл. 1 не учитывает зольность частиц твердой фазы, поскольку разработанная для отходов обогащения руд цветных металлов [1, 9-11]. Эта классификация так же не рассматривает гранулометрический состав твердой фазы, поскольку технология обогащения этих руд предполагает операции дробления и измельчения [12, 13]. Аналогичная ситуация имеет место и для структурированных суспензий на основе отходов углеобогащения, угольных шламов или водоугольного топлива, где также частицы твердой фазы подвергаются измельчению. В этом случае даже концентрация суспензии изменяется в незначительном интервале, а поэтому свойства структурированных суспензий определяются фактически зольностью и выходом летучих используемых углей [3-7].

Из результатов экспериментальных исследований [3-7] следует, что массовая концентрация структурированных суспензий, как одна из регулируемых характеристик, существенно влияет на их режим течения и реологические характеристики. В связи с этим важным параметром рассматриваемых дисперсных систем является предельное насыщение, под которым обычно понимают такую величину массовой концентрации твердой фазы в суспензии, при которой еще сохраняются её подвижность и текучесть, статическая и динамическая седиментационная стабильность, а также агрегативная устойчивость. Этот параметр зависит от степени гранулометрического распределения твёрдых частиц. При благоприятном сочетании этих факторов и тетраэдрической или ромбовидной пространственной решетке объём, занимаемый порами в общем объёме твердого тела, составляет от 23 до 25 %. Предельная объёмная концентрация в таких случаях может быть определена по зависимости [3-7] формула (1):

$$C_* = 1 - m, \quad (1)$$

где  $m$  – пористость твердой фазы, или доля объёма, занимаемая порами.

Массовую предельную концентрацию структурированных суспензий, на основании формулы (1), можно выразить через объёмную концентрацию суспензии по формуле (2)

$$C'_* = \frac{(1 + Ar)(1 - m)}{1 + Ar(1 - m)}, \quad (2)$$

однако эта величина не обеспечивает подвижность и текучесть, статическую и динамическую седиментационную стабильность, а также агрегативную устойчивость. Для этих факторов авторы исследований [3-7] предлагают умножить величину, получаемую по формуле (2) на коэффициент, зависящий от выхода летучих (рис. 1) формулы (3, 4):

$$\tilde{C}_* = C'_* K_C, \quad (3)$$

$$K_C = \frac{1}{1,044 + 0,0052V^{daf}}, \quad (4)$$

где  $\tilde{C}_*$  – допустимая массовая концентрация структурированной суспензии обеспечивающая ее подвижность, текучесть, статическую и динамическую седиментационную стабильность, а также агрегативную устойчивость;  $K_C$  – эмпирический корректирующий коэффициент (рис. 1).

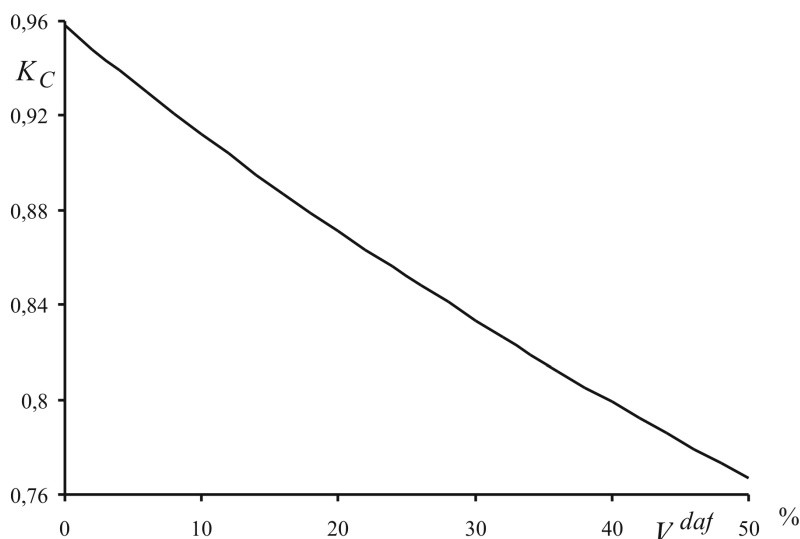


Рис. 1. Зависимость величины  $K_C$  от выхода летучих веществ из угля [3-7]

Величина  $K_C < 1$  в значительной мере зависит от гранулометрических характеристик исходного угля, степени его метаморфизма, выхода летучих веществ, плотности органической массы и элементного состава [3-7]. Так, массовая концентрация структурированных суспензий, приготовленной на основе антрацитов с выходом летучих 6,5%, может достигать 72,5%, тогда как для структурированных суспензий, приготовленная на основе угля марки Д с выходом летучих 44,0% эта величина достигает только 61,0%. Однако, авторы рекомендаций относительно коэффициента  $K_C$ , не учитывают, что сама величина  $C'_*$  зависит от зольности и выхода летучих, так как от этих величин зависят действительная и кажущейся плотности углей (табл. 3, рис. 1-3) [14-18].

Таблица 3

Зависимость удельного веса углей от вещественного состава и выхода летучих [14-18]			
Марка угля	Удельный вес	$V^{daf}$ , %	Стадия метаморфизма
Г	1,27	$\geq 35$	каменные I – II
ПЖ	от 1,27 до 1,29	30	каменные II – IV
К	от 1,30 до 1,33	20	каменные IV – V
ПС	1,34	18	каменные V – VI
Т	от 1,35 до 1,39	12	каменные VI
А	1,45	$< 8$	антрациты VII – X

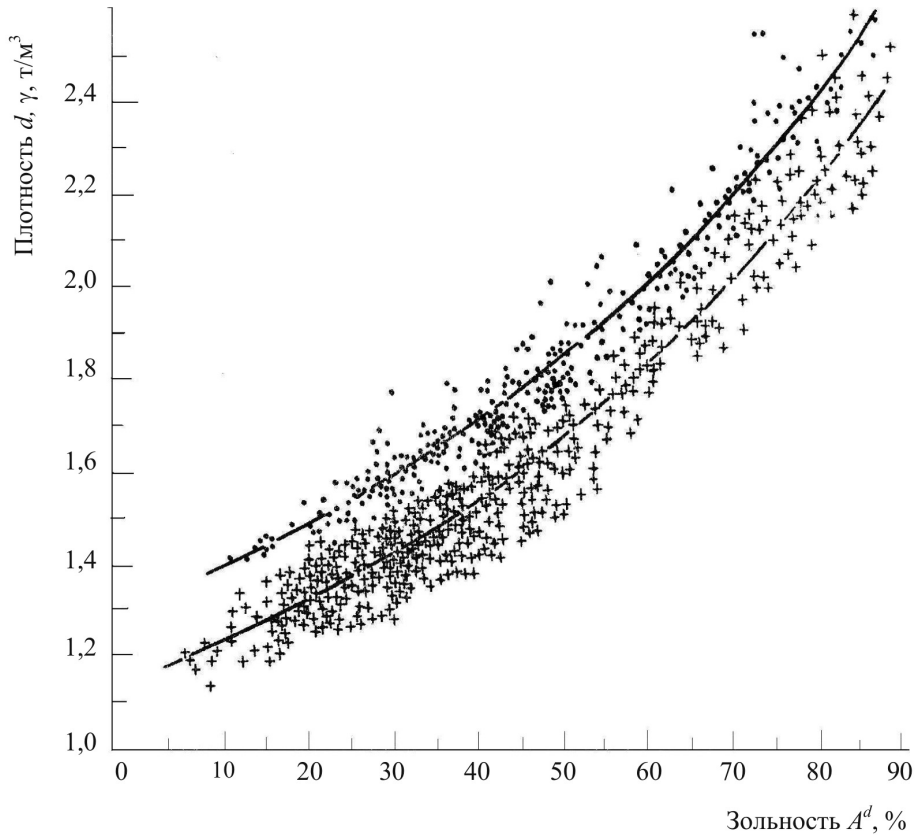


Рис. 2. Зависимость действительной (точки)  $d$  и кажущейся (крестики)  $\gamma$  плотности от зольности  $A^d$  для угольных пластов Экибастузского месторождения. Сплошная линия – аппроксимирующая функция [16]

Результаты численной обработки данных представленных в табл. 3 и на рис. 1-3 показывают, что рассматриваемые зависимости с инженерной точностью можно аппроксимировать следующим образом:

$$Ar = \frac{\rho_0}{1 - K_2 A^d} - 1, \quad (5)$$

$$\rho_0 = \frac{1,7869}{V^{daf 0,0997}}, \quad (6)$$

где  $\rho_0$  – относительная плотность угля при нулевой зольности (рис. 3);  $A^d$  – зольность угля;  $K_2$  – коэффициент, определяемый для каждого бассейна (табл. 4) [16];  $V^{daf}$  – выход летучих веществ на сухую массу угля.

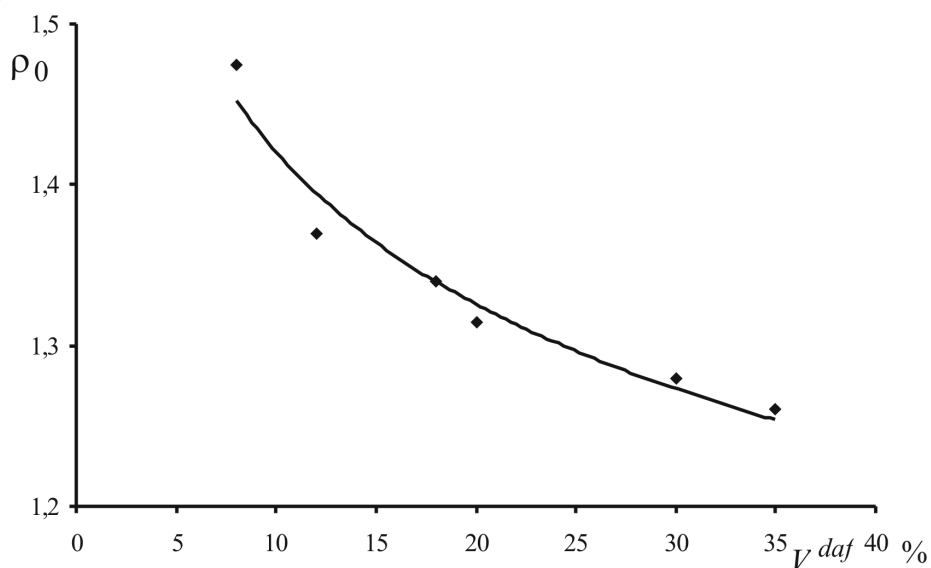


Рис. 3. Зависимость  $\rho_0$  углей от  $V^{daf}$

Таблица 4

Кажущаяся  $\gamma_0$  плотность угля при  $A^d = 0\%$  и коэффициент  $K_2$   
для обратного вида связи плотности и зольности

Месторождение, бассейн	Марка угля	$\gamma_0$ , г/см <sup>3</sup>	$K_2$
Днепровский	Б1	–	–
Подмосковный	Б2	–	–
Бородинское	Б2	1,14	0,0061
Коркинское	Б3	1,24	0,0047
Богословское	Б3	1,23	0,0044
Ангренское	Б3	1,15	0,0052
Азейское	Б3	1,18	0,0052
Ерунаковское, Уропское	Д	1,23	0,0051
Черемховское	Г	1,24	0,0050
Экибастузский	Г-Ж	1,15	0,0062
Ткибульское	Г-Ж	1,14	0,0063
Томусинское	К	1,24	0,0055
Кондомское	ОС,Т	1,28	0,0055
Листвянское	Т,ПА	–	–

Поскольку в формуле (1) рассматривается пористость структуры твердой фазы в суспензии, то эта величина от  $A^d$  и  $V^{daf}$  не зависит. Таким образом, подставляя зависимости (5) и (6) в формулу (2), после несложных преобразований получим:

$$C'_* = \frac{1}{1 + 0,5596(1 - K_2 A^d) \frac{m}{1 - m} V^{daf 0,0997}} \quad (7)$$

Формулы (4) и (7) имеют одинаковую структуру, что может свидетельствовать о...

**Збагачення корисних копалин, 2015. – Вип. 60(101)**

## Загальні питання технології збагачення

вовати о том, что зависимость (7), позволяет рассчитать предельную массовую концентрацию  $\tilde{C}_*$  без применения коэффициента, зависящего от выхода летучих  $K_C$ .

Для анализа влияющих факторов формулу (7) рационально переписать в следующем виде, выделив зольность углей и пористость твердой фазы в отдельный параметр (рис. 4, 5):

$$C'_* = \frac{1}{1 + AV^{daf^{0,0997}}}, \quad (8)$$

$$A = 0,5596 \frac{1 - K_2 A^d}{1 - m} m, \quad (9)$$

где  $A$  – технологический параметр, учитывающий комплексное влияние зольность углей и пористость твердой фазы (рис. 4).

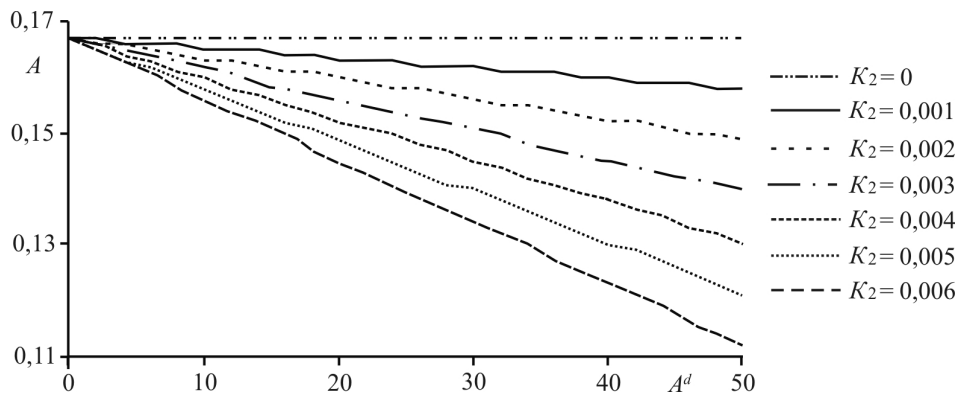


Рис. 4. Зависимость технологического параметра зольности углей

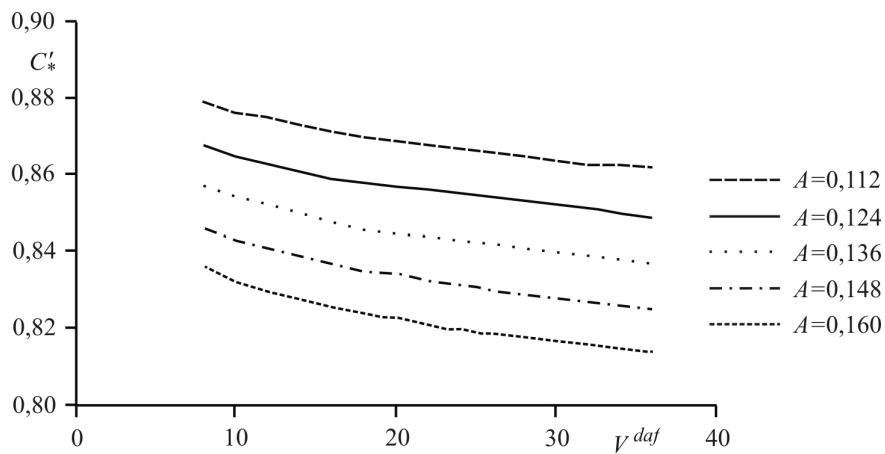


Рис. 5. Зависимость  $C'_*$  углей от  $V^{daf}$  при различных значениях технологического параметра

## **Загальні питання технології збагачення**

Таким образом, с использованием формул (1)-(7) можно определить рациональное значение концентрации структурированных суспензий, которое обеспечивает высокую производительность установки в структурном режиме течения и позволяет сохранить подвижность, текучесть, агрегативную устойчивость, статическую и динамическую седиментационную стабильность суспензии, с учетом как зольности, так и выхода летучих веществ использованных углей.

Отметим, что формула (7) получена впервые и позволяет определить величину предельно возможной концентрации структурированных суспензий от зольности частиц твердой фазы. Этот результат согласуется с результатами исследований [19, 20], выполненными с различными типами углей (от антрацита до лигнита) из разных частей мира, согласно которым максимальная концентрация структурированной суспензии на основе угля прямо пропорциональна содержанию углерода и обратно пропорциональна внутренней или равновесной влаге угля, содержанию кислорода и летучих.

### *Выводы*

Впервые установлена закономерность, выражающая зависимость предельно возможной концентрации структурированной суспензии от вида упаковки, зольности и выхода летучих частиц твердой фазы.

### **Список литературы**

1. Александров В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации. – С.-Пб.: СПГИ (ТУ), 2000. – 117 с.
2. Мурко В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: Дисс. ... д-ра техн. наук. – Новокузнецк: НГНПП Экотехника, 1999. – 289 с.
3. Круть О.А. Водовугільне паливо. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
4. Світлий Ю.Г., Круть О.А. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів. – Донецьк.: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
5. Білецький В.С., Круть О.А., Власов Ю.Ф. Дослідження характеристик водовугільного палива залежно від властивостей вихідного вугілля // Науковий вісник НГУ. – 2006. – №6. – С. 46-49.
6. Круть А.А., Папаяни Ф.А. Технология приготовления водоугольного топлива с предварительным смешением исходных компонентов // Сб. науч. праць НГУ. – 2001.– № 3. – С. 111-118.
7. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости: Пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 155 с.
8. Костовецкий, С.П., Мурко В.И., Олофинский Е.П. Некоторые результаты исследований процессов приготовления, транспортирования и прямого сжигания водоугольной суспензии // Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем: Сб. научн. тр. / НПО Гидротрубопровод. – М, 1989. – С. 4-10.
9. Каненков В.В. Снижение энергоемкости гидравлического транспортирования полидисперсных гидросмесей на предприятиях горной промышленности: Дисс. ... канд. техн. наук. – С.-Пб: ГГИ, 2006. – 150 с.
10. Альмагер М.В. Обоснование технологической схемы и параметров комплекса для транспортирования высококонцентрированной гидросмеси на латеритовых карьерах (республика Куба): Дисс. ... канд. техн. наук. – С.-Пб: ГГИ, 2006. – 140 с.
11. Авксентьев С.Ю. Определение рациональных режимов гидротранспорта пастооб-

## **Загальні питання технології збагачення**

разных хвостов обогащения медно-цинковой руды: Дисс. ... кандидата техн. наук. – С.-Пб: ГГИ, 2009. – 129 с.

12. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. – М.: Недра, 1981. – 343 с.

13. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 415 с.

14. Справочник по обогащению углей / Под ред. И.С. Благоева, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 614 с.

15. Кафтанатий А.Б., Январев Г.С. Ископаемые угли: учеб. пособие. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2001. – 45 с.

16. Такранов Р.А., Шеремет А.Н., Лагай Н.В. Оперативное определение показателей качества и свойств угля в маркшейдерско-геологической практике: учеб. пособие. – С.-Пб: ГГИ, 2005. – 75 с.

17. ГОСТ 25543-88. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим параметрам. – Введ. 1990.01.01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1990. – 17 с.

18. ГОСТ 21489-76. Угли бурые, каменные и антрациты. Разделение на стадии метаморфизма и классы по показателю отражения витринита. – Введ. 1977.01.01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1977. – 48 с.

19. Баранова М.П. Совершенствование технологии получения водоугольных суспензий: Дисс. ... канд. техн. наук. – Красноярск: КГТУ, 2006. – 114 с.

20. Watanabe, S. Effekt of several factors on high concentrated coal-water slurry reological properties / S. Watanabe, K. Katabe // Symp. On Coal Slurry Combastion. Florida. – 1984. – P. 467-478.

© Семененко Е.В., Рубан В.Д., Подоляк К.К., 2015

*Надійшла до редколегії 14.03.2015 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Надутим*