

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОПТИМАЛЬНЫЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ

Е.В. Семененко, В.Д. Рубан, К.К. Подоляк, ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины, Украина

Рассмотрены факторы, влияющие при дроблении и измельчении частиц твердой фазы, в процессе приготовления структурированных суспензий. Модернизация ж технологии приготовления структурированных суспензий, за счет выбора параметров дробления и измельчения угля, обеспечит бимодальный гранулометрический состав твердой фазы, а следовательно и оптимальные параметры данного вида топлива.

Важнейшим технологическим фактором, определяющим свойства структурированных суспензий (СС), является гранулометрический состав (ГС) угля, получаемый в результате измельчения. Результаты исследований ведущих отечественных специалистов [1] и мировой опыт внедрения технологий приготовления водоугольного топлива (ВУТ) [2,3] свидетельствуют о том, что достигнуть максимальной концентрации, а, следовательно, энергетического потенциала СС можно только при бимодальном ГС твердой фазы, обеспечивающем максимальную упаковку частиц [4]. При этом СС, у которых ГС твердой фазы характеризуются бимодальностью, обладают наиболее оптимальными, с точки зрения подвижности и текучести, статической и динамической седиментационной стабильности, а также агрегативной устойчивости, реологическими свойствами [5-7]. С учетом этого наиболее рациональным направлением оптимизации технологий приготовления СС является выбор параметров технологии дробления и измельчения исходного угля, обеспечивающих бимодальный ГС твердой фазы. На сегодняшний день для дробления и измельчения угля при приготовлении СС обычно используются барабанные и стержневые мельницы [8-12], сведения об применении технологий струйного помола и самоизмельчения отсутствуют. Это предопределяет высокую энергоемкость процесса приготовления, когда на одну тонну измельчаемого угля затрачивается от 90 до 110 кВт·ч электроэнергии [13]. В мировой практике для мокрого измельчения угля наибольшее распространение получили шаровые и стержневые барабанные мельницы различных типоразмеров, конструктивного исполнения и производительности (Порто Торрес – Италия, Белово-Новосибирск – Россия). В то же время различными исследователями как в нашей стране так и за рубежом в лабораторных условиях и на пилотных установках испытывались измельчительные устройства других типов (дезинтеграторы, винтовые пружинные мельницы и т. д.). Барабанные мельницы мокрого измельчения изначально предназначались и используются в настоящее время в горнорудной, строительной и цементной промышленности. Такие мельницы в угольной промышленности использование до недавнего времени мало использовались. Во всех рассмотренных случаях не учитываются особенности структуры измельчаемого продукта и эффекты связанные с резонансным разрушением, при котором происходит последовательный разрыв межатомных связей и образование отдельных фрагментов твердого тела, возникающие при взаимодействии материала с мелющими телами. В то время как учет этих факторов позволяет получить требуемый бимодальный ГС с минимальными энергозатратами.

Цель статьи – обоснование направления модернизации технологии приготовления СС за счет выбора параметров технологии дробления и измельчения исходного угля, обеспечивающих бимодальный ГС твердой фазы, с учетом особенности структуры измельчаемого продукта и эффекты, возникающие при взаимодействии материала с мелющими телами.

Интерес разработчиков технологий приготовления СС сегодня сосредоточен на технических решениях, обеспечивающих бимодальный ГС твердой фазы (рис. 1) [9]. Решение этой проблемы

сдерживается отсутствием научно обоснованных параметров ГС, характеризующих его бимодальность, и обеспечивающих все выше перечисленные реологические и седиментационные свойства. Для этого требуется объяснить:

- почему бимодальный ГС твердой фазы обеспечивает такие эффекты;
- какое соотношение мод диаметров частиц обеспечивает оптимальные свойства СС;
- какое распределение фракций по модам частиц является рациональным;
- каким должно быть содержание фракций, находящихся между модами диаметров частиц.

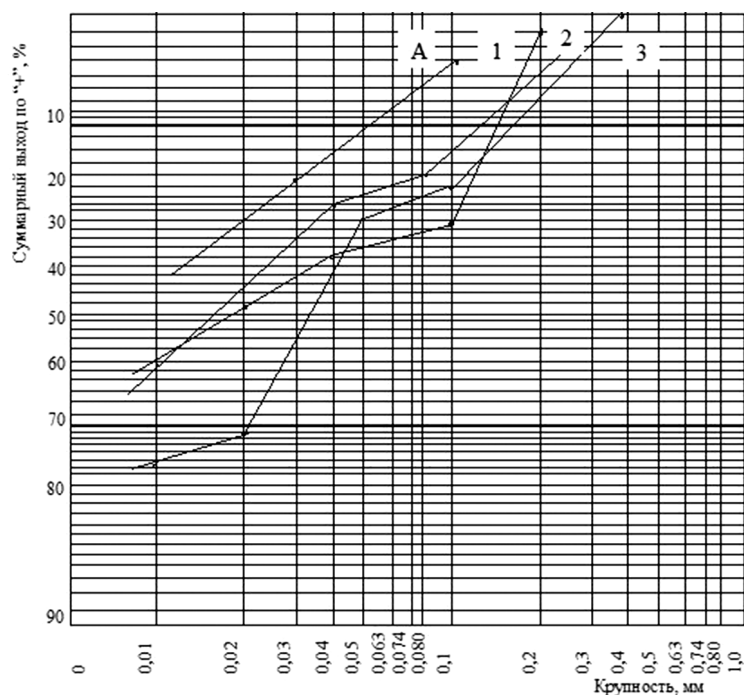


Рис. 1. Гранулометрическое распределение исходного угля марки «Г»:
 А – одноmodalный состав; 1, 2, 3 – бимодальные составы

Однозначного ответа на все эти вопросы нет, а существующие научные подходы противоречат друг другу и могут пояснить только либо плотную упаковку частиц, в случае бимодальности ГС частиц твердой фазы, или рациональные реологические свойства СС.

Ряд авторов плотную упаковку частиц и оптимальные реологические свойства СС с бимодальным ГС твердой фазы объясняют возможностью размещения частиц малого диаметра между частицами большего диаметра, которые образуют в жидкой фазе структуру с кубической упаковкой частиц [5 – 7]. Для получения плотной структуры можно из частиц с бимодальным ГС, когда пустоты, образующиеся при любом типе упаковки, заполняются зернами меньших размеров, необходима существенная разница в средневзвешенных диаметрах фракций (табл. 1). При этом пористость будет уменьшена всего на 10 %. Так сферические частицы одинакового размера можно уложить в пирамидальную или тетрагональную структуру с пористостью 26%, а при введении частиц меньших размеров пористость снижается до 15 – 19%. Достижения таких значений пористости для бимодального материала возможно при условии, что размер частиц меньшей фракции будет значительно меньшим, чем размер пустот, образованных частицами крупных фракций. Например, в бетонах соотношение диаметров частиц достигает 16, а выход фракций должен быть, примерно, 7:3. Этот подход позволяет объяснить высокую плотность и энергетический потенциал СС, однако не может разъяснить высокую подвижность, текучесть, агрегативную устойчивость, статическую и динамическую седиментационную стабильность.

С точки зрения другой группы исследователей СС с бимодальным ГС твердой фазы обладают слабо выраженными тиксотропными свойствами [1]. В основу исследований этих ученых положена теория устойчивости лиофобных коллоидов, предполагающая, что в тиксотропной тонкодисперсной водной суспензии суммарная энергия взаимодействия двух сферических частиц состоит из ионно-электростатической и молекулярной дисперсионной (Ван-дер-Ваальсовой) составляющих.

Таблица 1. Параметры структуры твердой фазы суспензии

Параметры структуры	Отношение диаметра меньшей и большей частиц				
	1	0,414	0,225	0,175	0,117
Кратность диаметров	1	2.42	4.44	5.71	8.55
Количество мелких частиц в порах	0	1	2	8	8
Пористость, %	26,0	20,7	19,0	15,8	14,9

При этом, фиксация соседних зерен в коагуляционной структуре может быть двух типов: необратимая в первом потенциальном минимуме и обратимая – во втором [2, 3]. Необратимая коагуляция нарушает гомогенность СС, приводит к резкому ухудшению агрегативной устойчивости и реологических характеристик. Обратимая коагуляция обеспечивает тиксотропные свойства СС [10, 14]. Тиксотропные характеристики СС в целом определяются величиной и координатой второго энергетического минимума смежных частиц, существование которого обусловлено тем, что энергия молекулярно дисперсионного взаимодействия с ростом расстояния между частицами убывает по степенному закону, а кривая энергия ионно-электростатического взаимодействия – по экспоненциальному, т. е. последняя убывает быстрее, чем первая. Однако эта теория оперирует не крупностью частиц, а поверхностным потенциалом твердой частицы, который может быть больше или меньше энергетического барьера отталкивания, появляющегося при значениях потенциала двойного электрического слоя на поверхности твердой частиц близких к 50 мВ. При меньших значениях этого потенциала СС агрегативно неустойчивая, так как под действием дисперсионных Ван-дер-Ваальсовских взаимодействий её твердые частицы необратимо коагулируют, и происходит расслоение суспензии. При больших – наблюдаются два характерных явления: существенно возрастает высота энергетического барьера отталкивания, что повышает агрегативную устойчивость СС, и координата второго энергетического минимума смещается вправо, что увеличивает расстояние между твердыми частицами, которые зафиксированы во втором энергетическом минимуме тиксотропной структуры.

Таким образом, в рамках теории устойчивости лиофобных коллоидов при анализе энергетического состояния твердой фазы СС установлено, что явление необратимой коагуляции зерен твердой фазы определяется наличием частиц с малым энергетическим потенциалом, а частицы с большим потенциалом определяют расстояние, на котором наблюдается необратимая коагуляция в первом энергетическом минимуме. То есть оптимальные свойства СС определяются не соотношением размеров твердых частиц, или содержаний их фракций, а их поверхностным потенциалом, что объясняет эффект устойчивости суспензии, но не объясняет высокой плотности упаковки частиц.

Третья группа исследователей придерживаются постулатов автоколебательной концепции разрушения материалов при дроблении и измельчении [15]. Согласно этой концепции при обмене энергией и веществом с окружающей средой кристаллическая решетка с дефектами представляет собой автоколебательную систему – релаксационный генератор с двумя характерными масштабами времени: продолжительностью быстрых и медленных процессов релаксации. Быстрые процессы релаксации характеризуют процессы разрушения, а медленные –

процессы взаимодействия частиц между собой и с мелющими телами, то есть, процессы поступления энергии в систему. Когда продолжительность этих процессов в системе оказывается сравнимой, наступает резонансное разрушение, происходит последовательный разрыв межзатомных связей и образование отдельных фрагментов твердого тела. С учетом этого на кривой ГС материалов, подвергаемых дроблению или измельчению, существуют два максимума, один из которых связан с длиной излучаемой при соударении волны, а второй – с размером неоднородностей, таких как трещины или поры. При этом между двумя максимумами располагается один минимум, что позволяет характеризовать такие материалы как бимодальные.

Однако эта бимодальность ГС обусловлена свойствами материала и особенностями технологии измельчения. В то время как бимодальность ГС, рассматриваемая в литературе по технологиям приготовления СС, обусловлена возможностью плотной укладки частиц твердого, за счет размещения более мелких классов в пространстве между более крупными частицами. Таким образом, любой материал, подвергнутый измельчению в зависимости от выбранного способа помола, будет характеризоваться бимодальным ГС. Однако для каждого материала существует ГС, обеспечивающий максимальную упаковку твердых частиц, и также является бимодальным. Одна из задач оптимальной технологии приготовления СС является выбор способа измельчения при котором оба эти бимодальных ГС совпадали.

Из анализа ГС материалов, подвергающихся измельчению в различных технологических циклах, можно сделать вывод, что бимодальность ГС предопределяется используемым методом измельчения материала. С учетом этого бимодальный ГС можно характеризовать следующими параметрами:

$$d_1 = K_b d_2; \quad d_m = K_m d_2; \quad K_b = \frac{1}{K_d}; \quad K_m = \frac{1 + \sigma(K_d - 1)}{K_d}, \quad (1)$$

где d_1 – минимальный преимущественный размер в распределении частиц; d_2 – максимальный преимущественный размер в распределении частиц; d_m – диаметр частиц, соответствующий минимуму на кривой ГС а между двумя преимущественными размерами; K_d – постоянная кратности преимущественных размеров в распределении частиц равная 3 ± 1 [15-17] σ – параметр, характеризующий место расположение минимума относительно максимум, для частиц талько-магнезитовых пород при струйном измельчении составляет 0.419, для частиц железной руды – $0,276 \pm 0,147$.

Известны эксперименты по управлению ГС твердой фазы ВУТ путем изменения ГС шаровой загрузки мельницы (табл. 2 – 4) [9]. Авторы утверждают, что это позволяет получить ГС различной степени бимодальности, с различной седиментационная устойчивостью СС (табл. 5).

Таблица 2. Гранулометрический состав угля перед измельчением [9]

Крупность, мм	+ 3,0	1,0-3,0	0,3-1,0	0,25-0,3	0,1-0,25	0,08-0,1	0,04-0,08	0-0,04
Выход, %	0,76	7,71	19,52	14,24	12,35	10,24	4,41	30,77

Таблица 3. Гранулометрический состав измельченного угля [9]

Крупность, мм	Выход классов для различных вариантов загрузки шаровой мельницы, %				
	I	II	III	IV	V
+ 0,50	0,7	–	–	–	–

0,30-0,50	0,8	–	–	–	–
0,25-0,30	0,6	0,1	0,5	–	1,1
0,20-0,25	2,8	2,8	2,7	–	3,3
0,10-0,20	9,9	8,0	8,5	4,3	9,2
0,08-0,10	23,0	18,5	19,5	15,5	21,9
0,04-0,08	7,1	6,5	6,8	4,5	6,1
0,02-0,04	30,1	33,8	34,0	33,2	31,9
– 0,02	25,0	30,3	28,0	42,5	26,5

Таблица 4. Характеристики вариантов шаровой загрузки мельницы [9]

Варианты загрузки	Гранулометрический состав шаровой загрузки мельницы, %			
	Диаметр шаров, мм			Средневзвешенный диаметр, мм
	40	20	10	
I	100	–	–	40,0
II	50	25	25	27,5
III	60	20	20	30,0
IV	40	30	30	25,5
V	70	15	15	32,5

Расчет параметров ГС твердой фазы СС для приведенных результатов показывает (табл. 6), что разрушение материала происходит в соответствии с автоколебательной концепцией. Это явно следует из величины кратности преимущественных размеров в распределении частиц соотношения. При этом, величина этого параметра оказывает влияние и на седиментационную устойчивость СС – чем выше значение K_d (табл. 6), тем выше седиментационная устойчивость (табл. 5).

Таблица 5. Седиментационная устойчивость ВУТ при различных гранулометрических составах твердой фазы [9]

Гранулометрический состав угля	Седиментационная устойчивость
Вариант I	не более 1 суток
Вариант II	не более 3 суток
Вариант III	не менее 15 суток
Вариант IV	не расслаивается в течение 30 суток
Вариант V	не более 1 суток

Таблица 6. Параметры гранулометрического состава измельченного угля

Параметр	Значение параметров для различных вариантов загрузки мельницы				
	I	II	III	IV	V
d_1	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
d_2	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
d_m	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
K_d	3	3	3	4,5	3
K_b	0,33	0,33	0,33	0,22	0,33
K_m	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
σ	0,499	0,499	0,499	0,571	0,499

Анализ ГС материалов, используемых в геотехнологических систем для приготовления СС (табл. 2 – 4), а также их реологических характеристик, показывает, что реологические характеристики таких суспензий описываются законом Бингама-Шведова, значения параметров в котором определяется концентрацией суспензии и соотношением массовых долей фракций меньшей и большей чем d_m . Численная обработка результатов экспериментальных исследований реологических характеристик СС, полученных из материалов с различными бимодальными ГС, позволяет рекомендовать следующие зависимости для расчета начального напряжения сдвига и эффективной вязкости СС [9]:

$$\tau_0 = \begin{cases} 0,4061 \cdot \Gamma^{1,7471} & C < 65 \\ \frac{7,2856}{\Gamma^{0,9267}} & C \geq 65 \end{cases}; \quad \eta = 0,2921 \cdot \Gamma^{0,40261}; \quad \Gamma = \frac{P_{-0,06}}{P_{+0,06}}, \quad (5)$$

где Γ – параметр, характеризующий бимодальность ГС твердой фазы СС; $P_{-0,06}$ – доля частиц твердой фазы СС крупностью менее 0,06 мм; $P_{+0,06}$ – доля частиц твердой фазы СС крупностью более 0,06 мм; C – массовая концентрация суспензии, %.

Сопоставление данных табл. 1, 3 и 6, свидетельствуют о слабом снижении пористости в результате формирования бимодального ГС. Величина K_d изменяется от 3 до 4,5, в то время как для существенного уменьшения пористости требуются значения от 5.71 до 8.55, которые считаются недостижимыми с точки зрения автоколебательной концепции разрушения.

С учетом выражения (5) закон Бингама-Шведова для рассматриваемых СС может быть записан в следующем виде:

$$\tau = 0,2921(A + \dot{\epsilon})\Gamma^{0,40261}; \quad A = \begin{cases} 1,39\Gamma^{1,34} & C < 65 \\ \frac{24,94}{\Gamma^{1,33}} & C \geq 65 \end{cases}, \quad (6)$$

где τ – касательные напряжения; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации.

Таким образом, из материалов, приведенных статье, можно сделать следующие выводы.

1. Бимодальный ГС твердой фазы СС, при ее приготовлении с использованием операций дробления и измельчения формируется в соответствии автоколебательной концепции разрушения материала, с учетом характерных размеров внутренних дефектов кристаллической решетки, размеров разрушаемых частиц и мелющих тел. При этом, наиболее вероятным для этого случая способом управления ГС частиц твердой фазы СС является изменение размеров мельющих тел и частоты вращения барабана.

2. При приготовлении СС с бимодальным ГС твердой фазы, добиться низких значений пористости использованием только операций дробления и измельчения невозможно. Для достижения этой цели необходимо использовать также операции грохочения и классификации.

3. Агрегативная устойчивость СС определяется не только бимодальностью ГС твердой фазы, но и величиной поверхностного потенциала твердых частиц и значением энергетического барьера отталкивания, появляющегося при значениях потенциала двойного электрического слоя на поверхности твердой частиц близких к 50 мВ.

Список литературы

1. Білецький В.С., Круть О.А., Світлий Ю.Г. Перспективи впровадження технології водовугільного палива у малій теплоенергетиці України // Форум гірників. Матеріали міжнародної конференції. – Дніпропетровськ. – 2007. – С.

2. Benedek K.R. et al. Coal-Fueled Diesels for Modular Power Generation-Operating Experience with 1,7 % Ash Coal-Water Slurry // The Proceedings of the 20-th International Technical Conference

on Coal Utilization & Fuel Systems – 1995.– March.–Clearwater, Florida, USA.–P. 721 – 723.

3. Bradish Thomas J. et al. Utility Applications for Coal-Water Slurry Cofiring // The Proceedings of the 20th International Conference on Coal Utilization & Fuel Systems.-March. 1995.-Clearwater, Florida, USA.–P. 523 –534.

4. Надутый В.П., Лапшин Е.С. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья [Текст] /В.П. Надутый, Е.С. Лапшин. – К.: Наукова думка, 2005. – 180 с.

5. Беденко В., Чистяков Б., Миньков В. и др. Изменение реологических свойств в зависимости от добавок ПАВ различной природы // Сб. научных трудов НПО «Гидротрубопровод» «Методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности высоко-коконцентрированных дисперсных систем».– М.–1987.– с. 15 – 22.

6. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Гос. изд-во физико-матем. Литературы. –1959. – 700 с.

7. Лучников В. Состояние энергетики Украины, возможности для инвесторов по реабилитации тепловых электростанций / Деловые возможности и потребность в инвестициях. / Украинско-американская объединённая конференция «Возможности модернизации украинских угольных электростанций». – К. – 1988.

8. Брагин, Б.Ф. Трубопроводный гидротранспорт твёрдых материалов: в 2 т. / Б.Ф. Брагин. – К.:ИСИ ВУГУ, 1993. – 327 с.

9. Круть О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.

10. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.

11. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

12. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю.Г. Світлий, О.А. Круть. – Донецьк.: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.

13. Світлий Ю.Г. Измельчение мелких классов угля при гидротранспорте на большие расстояния // Гидравлическая добыча угля. – М.: ЦНИИТЭИУгля, 1966. – № 1.

14. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 191 с.

15. Горобец В.И., Горобец Л.Ж. Новое направление работ по измельчению. – М.: Недра, 1977. – 183 с.

16. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Применение автоколебательной теории разрушения для прогнозирования энергоёмкости процесса измельчения твердых тел // Доклады Академии наук СССР. – 1987. – Т. 292. – №5. – С. 106 – 111.

17. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. О проявлении дискретности твердых тел в процессе их измельчения // Доклады Академии наук СССР. – 1987. – Т. 292. – №5. – С. 1095 – 1100.