

УДК 622.648:[622.732:621.926.086]

В.Д. Рубан, К.К. Подоляк

(Украина, г. Днепропетровск, ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ ЗА СЧЕТ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ УГЛЯ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

Для отечественной экономики уголь остается основным энергоносителем. Поэтому ухудшение качества добываемых углей и повышение требований к экологической безопасности их обогащения требует модернизации геотехнологических систем путем повышения эффективности процессов приготовления и транспортирования суспензий. Мировой опыт показывает, что в этих условиях наиболее рациональным решением является формирование необходимых реологических свойств структурированных суспензий при их приготовлении и выбор рациональных режимов транспортирования. Это позволяет комплексно решить большую часть технологических, экологических, и, в конечном счете, экономических проблем.

Результаты анализа известных геотехнологий, основанных на применении структурированных суспензий [1,2], показывают, что основными технологическими процессами, применяемыми при приготовлении таких суспензий, являются: грохочение, дробление и измельчение, пропитывание, смешение и го-

могенизация. Одним же из наиболее энергоемких является процесс измельчения исходного угля до необходимой крупности. Поэтому уменьшение энергетических затрат на измельчение и дробление твердой фазы положительно повлияет на стоимость приготовления структурированных суспензий. Учитывая, что процесс приготовления структурированных суспензий предполагает смешение угля с водой и последующее транспортирование этой смеси в цистернах или по трубопроводу, перспективным будет совмещение этих процессов. Это возможно реализовать обеспечив измельчение угля при транспортировании в трубопроводах и центробежных насосах за счет истирания и соударения, а в железнодорожных цистернах – за счет дополнительного гидроимпульсного воздействия.

Идея исследования заключается в том, чтобы максимально использовать попутное измельчение угля, например, при транспортировке по трубопроводу и прохождении через углесос для достижения нужной степени измельчения. Модели процессов транспортировки известны и многочисленны, модели процессов пропитывания и дезинтеграции изучены не так хорошо, но примеры уже есть, однако никто не пытался решить задачу выбора параметров гидротранспортной системы, обеспечивающей не только доставку нужного количества твердого, но и измельчение его до требуемой степени дробления.

Процессы дробления и измельчения применяются для доведения минерального сырья до необходимой крупности или для получения требуемого гранулометрического состава. В процессе дробления и измельчения куски и частицы угля разрушаются внешними силами. Разрушение происходит преимущественно по ослабленным сечениям, трещиноватостям и другим дефектным местам структуры после перехода за предел прочности нормальных и касательных напряжений, возникающих в материале при его упругих деформациях – сжатии, растяжении, изгибе или сдвиге. Существует множество способов измельчения и дробления угля. Наиболее распространенным является механический способ, эффективны гидроимпульсный и электрогидроимпульсный способы измельчения, а также измельчение угля в трубопроводах при гидротранспортировании.

По технологическому назначению механические машины, применяемые для разрушения кусков и частиц минерального сырья и других материалов, разделяются на две основные группы: дробилки и мельницы. При мокром дроблении и измельчении дополнительно имеет место разрушение частиц в результате пропитывания их жидкостью. Кроме того, в ряде технологий приготовления структурированных суспензий процесс пропитывания является отдельной операцией, проводимой перед измельчением с целью снижения прочности частиц твердой фазы за счет эффекта Рибиндера. Как показывают результаты исследований некоторых авторов, в результате этого возможно не только снизить энергоемкость измельчения, но и улучшить характеристики гранулометрического состава измельченного материала, а также реологические параметры структурированных суспензий [2, 3, 4].

Гидроимпульсный и электрогидроимпульсный способы измельчения предполагают разрушение твердого материала под действием ударных волн, генерируемых в результате гидравлического удара. Известно также устройство для электрогидроимпульсной обработки угольных пластов [5], которое за счет создания мощных импульсных ударов в заполненной водой скважине при электрическом разряде между электродами трансформирует электрическую энергию в механическую. Для этого в скважину, пробуренную по пласту, вводятся электроды и под напряжением 5...8 кВ осуществляется импульсная обработка. При создании импульсов в скважине, заполненной водой, наблюдается электрический пробой, в результате которого в искровом разряде создается газообразная среда, которая по своим характеристикам является плотной низкотемпературной плазмой высокого давления. Вследствие сопротивления окружающей среды в массиве возникают высокие мгновенные давления, способствующие образованию ударных волн. Под воздействием гидравлических ударов угольный массив может разрушаться с появлением новых и раскрытием имеющихся трещин. Данный способ применим и для приготовления структурированных суспензий, так как образовавшаяся ударная волна посредством воды передает энергию на твердые частицы, вызывая тем самым их разрушение.

Измельчение горной породы также достигается при импульсном воздействии на нее. Так, одним из эффективных импульсных устройств является генератор импульсов давления (ГИД), который был разработан в ИГТМ НАН Украины (рис.1). Принцип его работы [6,7] основан на использовании явления периодически срывной кавитации. По мере увеличения скорости жидкости в узком сечении трубки Вентури происходит падение местного статического давления до критического значения, равного или близкого к давлению насыщенных паров жидкости. В результате этого возникает кавитация в виде кольцеобразной кавитационной зоны, распространяющейся по мере развития вдоль и в глубину (к оси) потока. При увеличении скорости потока в узкой части трубки кавитационная зона становится больше, образуя в районе максимальных скоростей и развитую кавитационную каверну. Таким образом, в потоке жидкости за генератором импульсного давления в преддиффузорной части создается избыточное давление, которое обеспечивает перемещение жидкости через суживающиеся и расширяющиеся части системы.

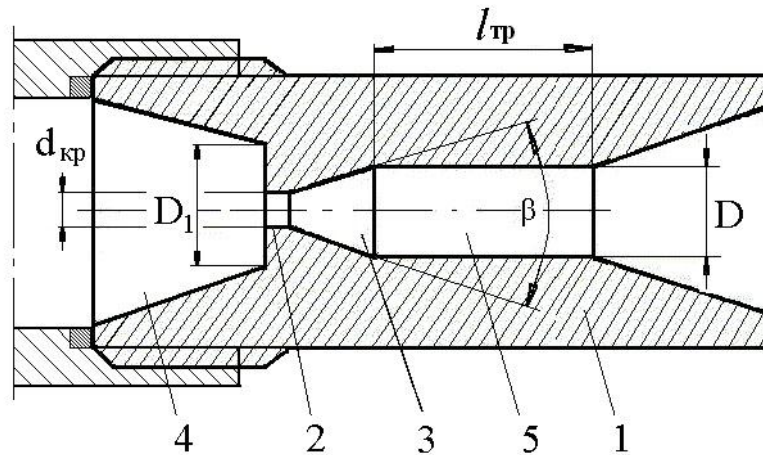


Рис. 1. Конструкция генератора импульсов давления : 1 – корпус; 2 – критическое сечение; 3 – диффузор кавитационной камеры; 4 – преддиффузорный проточный канал; 5 – последиффузорный канал.

При отрыве и схлопывании кавитационного пузырька, внутри него возникают высокие давления и температуры. Установлено, что в материале вблизи схлопывающегося пузырька температура повышается на 500-800⁰С, а внутри – на порядок выше. Схлопывание пузырька происходит в течение микросекунд, а возникающие ударные волны могут привести к высоким перепадам давления (до 4000 атмосфер) в окружающей пузырек жидкости. Волна давления от центра захлопывания распространяется по потоку на довольно большие расстояния (в экспериментах до 2,0 метров), а волна давления, которая распространяется против потока, демпфируется выросшей к этому моменту новой каверной, о чем свидетельствует отсутствие колебаний на входе в трубку Вентури, но она при этом принимает участие в формировании обратных течений и создает условия для отрыва следующей каверны. В потоке устанавливается процесс отрыва и захлопывания каверн, который самосинхронизируется.

Таким образом, в зависимости от геометрических параметров трубки Вентури в ней может происходить периодически срывное кавитационное течение, при котором осевшая каверна растет до максимальных размеров, а потом происходит отрыв ее в диффузорной части. Отличительной особенностью такого кавитационного течения являются стабильность частоты отрыва кавитационной каверны большого объема, расположенной в диффузоре, и её захлопывание. Гидроимпульсное воздействие на твердые частицы приводит к измельчению угля за счет ударной волны при схлопывании кавитационных пузырьков, а также к кавитационному воздействию на воду, увеличивая ее рН, что способствует интенсификации процесса разрушения.

Исследования [3, 8, 9] показывают, что интенсивность измельчения угля при гидротранспортировании в трубопроводах неодинакова по длине трубопровода. На начальном участке длиной от 3 до 5 км наблюдается наиболее интенсивное измельчение, характеризующееся резким уменьшением содержания крупных и крупно-средних классов, представленных кусками угля неправильной формы, имеющих минеральные включения, микро- и макротрещины. Скалывание выступающих неровностей и разрушение крупных кусков угля приводит к образованию мелких классов, а перетирание последних увеличивает выход микронных фракций. С увеличением расстояния транспортирования частицы угля приобретают округлую форму, крупность их уменьшается, структура становится более однородной, а сопротивляемость угля разрушению увеличивается.

Расчет трубопровода, для полидисперсной смеси образованной из материалов разных классов крупности, в конечном итоге сводится к:

$$H = L\lambda_0 \frac{V^2}{2gD} \left(1 + \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)} S_1 \right) + L\lambda_0 \frac{V^2}{2gD} \left(0.35S_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + fS_3 \right) \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)}, \quad (1)$$

где S_1, S_2, S_3 – объемные концентрации соответственно тонких, мелких и кусковых фракций; L – длина трубопровода; λ_0 – коэффициент гидравлического трения при движении воды; V – средняя расходная скорость гидросмеси; g – ускорение свободного падения; D – диаметр трубопровода; w – скорость степенного падения частиц мелкой фракции; d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции; f – обобщенный коэффициент трения частиц о нижнюю стенку трубы; Ar – параметр Архимеда.

Расчет трубопровода следует выполнить таким образом, чтобы в конце транспортирования получить уголь требуемой степени дробления. Для этого при всех прочих известных параметрах необходимо определить требуемую концентрацию, при которой обеспечивается не только доставка нужного количества угля, но и измельчение его до требуемой степени измельчения в рассматриваемых условиях.

Обработка экспериментальных данных [9] указывает на следующую зависимость степени измельчения угля при гидротранспортировании от крупности исходного угля и объемной концентрации гидросмеси:

$$i = a \frac{1 - 1,9S}{1 - S} d_{cp}^n, \quad (2)$$

где i – степень измельчения угля; S – объемная концентрация гидросмеси, д. е.; d_{cp} – средневзвешенная крупность угля перед гидротранспортированием, мм; a , n – эмпирические константы, зависящие от характеристик угля.

Углесос является необходимым элементом технологии трубопроводного транспорта. Сущность измельчения угля в углесосе заключается в дроблении угольных частиц при изменении направления потока гидросмеси. Поскольку энергия, необходимая для разрушения куска угля, определяется его массой и скоростью движения, то раскалыванию при одинаковой скорости подвергаются частицы, масса которых больше, т. е. интенсивность измельчения в углесосе зависит от крупности транспортируемого угля. Опытными подтверждается, что при уменьшении крупности исходного материала интенсивность измельчения в углесосе снижается. При гидротранспортировании угля средневзвешенной крупностью от 1,5 до 2,0 мм измельчения в углесосе практически не происходит. Зависимость степени измельчения от окружной скорости рабочего колеса и его порядкового номера при последовательном расположении углесосов можно описать уравнением вида [9]:

$$d_{cp} = i_P d_0; \quad (3)$$

$$i_P = 0,17 + 0,035V + 0,277m, \quad (4)$$

где i_P – степени измельчения угля в углесосе; d_0 – средневзвешенная крупность рядового угля, мм; V – окружная скорость рабочего колеса, м/с; m – общее количество колес последовательно работающих углесосов.

Для расчета параметров гидротранспортной установки в рассматриваемых условиях необходимо знать крупность и концентрацию транспортируемых частиц. В конечном итоге требуемая концентрация, при которой обеспечивается не только доставка нужного объема угля, но и измельчение его до требуемой степени дробления определяется как:

$$S = \frac{d_N - a(i_P d_0)^{n+1}}{d_N - 1,9a(i_P d_0)^{n+1}}, \quad (5)$$

где d_N – необходимая средневзвешенная крупность угля после гидротранспортирования, мм.

Обозначив составляющую уравнения (5) $a(i_P d_0)^{n+1}$ через P и разделив на d_N , получим следующее выражение для требуемой концентрации:

$$S = \frac{1 - \frac{P}{d_N}}{1 - 1,9 \frac{P}{d_N}}. \quad (6)$$

График зависимости требуемой концентрации транспортируемых частиц от суммарной степени дробления в углесосах и трубопроводах изображен на (рис. 2).

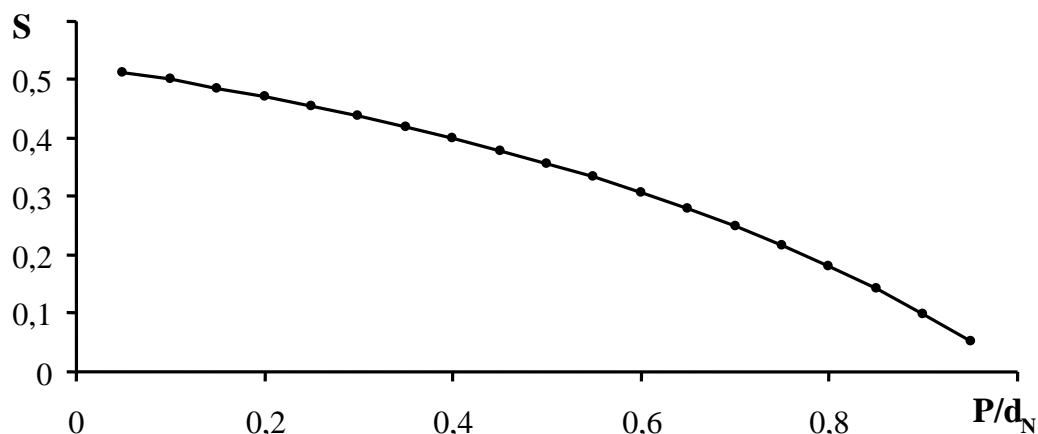


Рис. 2. Кривая зависимости объемной концентрации гидросмеси от суммарной степени дробления

Проведя линейную аппроксимацию требуемой концентрации транспортируемых частиц от суммарной степени дробления в углесосах и трубопроводах, получим уравнение линии тренда (рис. 3)

$$S = 0.5775 - 0.4935 \frac{P}{d_N} \quad (7)$$

при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0.9678$.

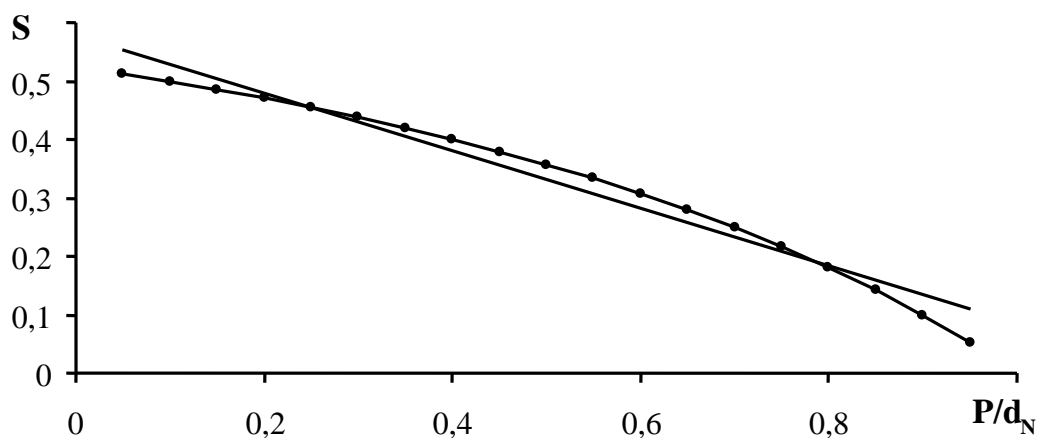


Рис. 3. График линейной аппроксимации объемной концентрации гидросмеси

Определение требуемой объемной концентрации гидросмеси для рассматриваемых условий позволяет связать воедино количество транспортируемого угля, степень измельчения частиц угля в углесосах и степень измельчения частиц в транспортных трубопроводах. Таким образом, гидротранспортная система решает одновременно три задачи: транспортирование, пропитывание и дезинтеграцию транспортируемых частиц с нужной степенью измельчения для последующего создания структурированных суспензий.

Использование угля в виде структурированной суспензии взамен традиционных энергоносителей обеспечивает чрезвычайно широкий спектр признанных во всем мире положительных технологических, экономических, экологических и трудовых эффектов. А поиск наименее энергоемких способов приготовления структурированных суспензий позволит сделать уголь конкурентоспособным с другими видами топлива.

Список литературы

1. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наук. думка, 2002. – 172 с.
2. Семенов, Е.В. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных водоугольных суспензий / Е.В. Семенов, А.А. Круть // Форум горняков – 2011: Материалы междунар. конф., октябрь, 2011 г. – Д.: НГУ, 2011. – С. 205 – 211.
3. Мурко, В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.07 / В.И. Мурко. – М., 1999. – 48 с.
4. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семенов, В.Д. Шурыгин. – Д.: Сич, 2001. – 224 с.
5. Сергеев И.В. Новые направления совершенствования способов дегазации угольных пластов / И.В. Сергеев, В.Г. Рыжков, Р.Г. Багдасаров // Проблемы горного дела. – М.: Недра, 1974. – С. 34–40.
6. Васильев Л.М. Научные основы процесса и создание технических средств нагнетания жидкости в угольные пласты для борьбы с вредными явлениями в шахтах : дис. доктора техн. наук: 05.15.11; 05.05.06 / Васильев Леонид Михайлович. – Д., 1985. – 307 с.
7. Родин А.В. Обоснование параметров и разработка погружного кавитационного генератора импульсов давления, обеспечивающего повышение эффективности предварительного увлажнения угольных пластов : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Родин А.В. – Днепропетровск, 1983. – 254 с.
8. Обоснование параметров и режимов работы гидротранспортных систем горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
9. Свитлый, Ю.Г. Расчет измеляемости угля при гидротранспорте / Ю.Г. Свитлый // Гидравлическая добыча угля. – 1966. – № 11. – С. 8 – 11.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Блюссом Б.А.