

ПРОПИТЫВАНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ПРИГОТОВЛЕНИИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Е.В. Семененко, И.Ю. Козарь, К.К. Подоляк, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

Обоснована перспективность использования водоугольного топлива в Украине. Рассмотрены математические модели процесса пропитывания угольного агломерата полностью погруженного в жидкость. Получены зависимости для определения времени и степени пропитывания угольного агломерата. Показана линейная аппроксимация степени пропитывания угольного агломерата от времени процесса.

Водоугольное топливо (ВУТ) – это дисперсная топливная суспензия, созданная на основе размолотого до частичек определенной крупности угля, воды и в случае необходимости химических водорастворимых примесей. Мировой опыт показывает, что в качестве исходного продукта для изготовления ВУТ можно использовать весь метаморфический ряд – от бурого угля до антрацитов, при этом изменяться будет только технология изготовления суспензии. В зависимости от состава угля и воды подбирают химические примеси, которые позволяют получить необходимые реологические, седиментационные и топочные свойства ВУТ. Обычно на практике в качестве химических примесей используют поверхностно-активные вещества (ПАВ). Следует исходить из экономических соображений и брать примеси, которые обеспечивают самое благоприятное соотношение производительность/экономичность, опираясь на существующие источники сырья для их изготовления и возможность их получения в промышленных условиях.

В последние годы интерес к технологии ВУТ усиливается постоянным ростом стоимости нефти и газа, которые занимают ключевые позиции в энергобалансе многих стран. Согласно Энергетической стратегии Украины добыча угля будет увеличиваться и на период до 2015 года объем добычи прогнозируется на уровне 91,7 млн т в год. Переход ТЭЦ на уголь позволит сэкономить до 6 млрд м³ газа в год. Таким образом, тенденция перехода Украины на ВУТ, исключаящее использование мазута и природного газа даже для подсветки котлов, работающих на угле, открывает привлекательные перспективы для разработки новых технологий приготовления водоугольного топлива.

Известные технологии приготовления ВУТ предполагают три возможных варианта образования суспензии: смешивание после операции измельчения исходного угля, смешивание в процессе измельчения и смешивание воды с углем до подачи в мельницу. Как показывают результаты экспериментальных исследований, суспензия, приготовленная с предварительным перемешиванием, обладает более высокими показателями по статической и динамической седиментационной стабильности, агрегативной устойчивости и реологическим характеристикам [1, 2]. Поэтому исследование процесса пропитывания угольных агломератов является актуальной задачей. Интенсификация данного процесса возможна при разупрочнении угля поверхностно-активными веществами и с помощью электрогидравлического воздействия [3].

Рассмотрим процесс пропитывания угольного агломерата сферической формы радиусом δ_s , полностью погруженного в жидкость. Предположим, что за некоторый промежуток времени жидкость профильтровалась на определенную глубину. В результате одна часть агломерата будет заполнена сжатым газом, а наружный слой – фильтрующейся жидкостью. Поверхность сферы с радиусом δ_0 является границей раздела двух фаз – газа и жидкости. Уравнение пропитывания такого угольного агломерата будет иметь вид [4, 5]:

$$\frac{d\delta_0}{dt} = - \frac{mf_{жс}}{\rho_{жс}g} \frac{(p_{атм} + \rho_{жс}gz + 4\sigma / \delta_p)\delta_0^{3n} - p_{атм}\delta_s^{3n}}{(\delta_s - \delta_0)\delta_0^{3n+1}} \delta_s, \quad (1)$$

с начальным условием

$$\delta_0(t=0) = \delta_s, \quad (2)$$

где t – время, с; m – пористость материала частицы; $f_{жс}$ – коэффициент фильтрации, м/с; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $p_{атм}$ – атмосферное давление, Па; z – геометрический напор в рассматриваемом сечении, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; δ_p – средний диаметр поры, м; n – показатель политропы процесса.

Приведем уравнение (1) к безразмерному виду. Для этого введем следующие обозначения

$$x = \frac{\delta_0}{\delta_s}; \quad h = 1 + \frac{\rho_{жс}gz}{p_{атм}} + \frac{4\sigma}{\delta_p p_{атм}}; \quad \tau_h = \frac{t f_{жс} m p_{атм} h}{\rho_{жс} g \delta_s^2}, \quad (3)$$

где x – степень пропитывания угольного агломерата; h – безразмерное давление; τ_h – безразмерное время.

Подставляя выражения (3) в (1, 2) выведем уравнение пропитывания угольного агломерата с начальным условием в безразмерном виде

$$\frac{dx}{d\tau_h} = -\frac{x^{3n} - 1/h}{(1-x)x^{3n+1}}, \quad (4)$$

$$x(\tau_h = 0) = 1. \quad (5)$$

Из анализа литературы [4] следует, что можно принять $n = 1$. Тогда проинтегрировав уравнение (4) с учетом начального условия (5), получим выражение для определения времени пропитывания угольного агломерата в безразмерном виде

$$\begin{aligned} \tau_h = \frac{1}{6} & \left(2x^3 - 3x^2 + 1 - h^{-2/3} \left(2 \ln \left(\frac{xh^{1/3} - 1}{h^{1/3} - 1} \right) - \ln \left(\frac{x^2 h^{2/3} + xh^{1/3} + 1}{h^{2/3} + h^{1/3} + 1} \right) \right) \right) + \\ & + 2h^{-1} \ln \left(\frac{x^3 h - 1}{h - 1} \right) - 2\sqrt{3} h^{-2/3} \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{3} h^{1/3} (x - 1)}{2 + 2xh^{2/3} + (x + 1)h^{1/3}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

В некоторых случаях последними тремя слагаемыми в уравнении (6), согласно результатам работы [4], можно пренебречь. В результате безразмерное время пропитывания угольного агломерата определяется по выражению

$$\tau_h = \frac{1}{6} (2x^3 - 3x^2 + 1). \quad (7)$$

Для определения степени пропитывания угольного агломерата x решим кубичное уравнение (7) по формулам Кардано [6]. Учитывая, что $0 \leq x \leq 1$, уравнение (7) будет иметь только один действительный корень

$$x = \frac{1}{2} - \cos \left(\frac{\arccos(12\tau_h - 1)}{3} + \frac{\pi}{3} \right). \quad (8)$$

Теперь рассмотрим процесс пропитывания угольного агломерата, полностью погруженного в жидкость, воздействуя на него внешним электрическим полем и пренебрегая эффектом заземления газа. Запишем уравнение, определяющее поток жидкости в пропитываемой частице [7]

$$\frac{dj}{d\delta_0} = -\frac{d}{d\delta_0} \left(\frac{[K]}{\eta} \cdot 4\pi \cdot \delta_0^2 \frac{dp}{d\delta_0} \right), \quad (9)$$

граничные условия имеют вид

$$p(\delta_0 = \delta_s) = p_{атм}, \quad (10)$$

$$p(\delta_0 = 0) = p_{атм} + p_k + E\rho_{зар} = p_{атм} - \frac{\sigma \cos \theta \cdot s}{b} - \frac{\varepsilon E}{4\pi\delta_s} \cdot (\xi - \psi), \quad (11)$$

где j – поток жидкости в пропитываемую частицу, м³/с; $[K]$ – проницаемость, м⁵/кг; η – вязкость, Н·с/м²; p_k – капиллярное давление, Па; E – напряженность электрического поля, В/м; $\rho_{зар}$ – поверхностная плотность заряда, Кл/м²; θ – угол смачивания; s – удельная поверхность, м²/кг; b – пористость, м³/кг; ε – диэлектрическая постоянная, Ф/м; ξ – дзета-потенциал, В; ψ – потенциал, вызванный насыщением двойного слоя в отсутствие напряженности электрического поля, В.

Решив уравнение (9) получим

$$j = \frac{4\pi\delta_s\delta_0}{\delta_s - \delta_0} \cdot \frac{[K]}{\eta} \cdot \left(\frac{\sigma \cos \theta \cdot s}{b} + \frac{\varepsilon E}{4\pi\delta_s} \cdot (\xi - \psi) \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (12)$$

Уравнение фронта пропитывания частицы записывается в следующем виде [7]

$$4\pi b \delta_0^2 \frac{d\delta_0}{dt} = -j. \quad (13)$$

Подставим выражение (12) в уравнение (13)

$$\delta_0(\delta_s - \delta_0) \frac{d\delta_0}{dt} = - \left(\delta_s \cdot \frac{[K]}{\eta b} \cdot \left(\frac{\sigma \cos \theta \cdot s}{b} + \frac{\varepsilon E}{4\pi\delta_s} \cdot (\xi - \psi) \right) \right). \quad (14)$$

Введем следующее обозначение

$$\tau_e = \frac{1}{\delta_s^2} \cdot \frac{[K]}{\eta \cdot b} \cdot \left(\frac{\sigma \cos \theta \cdot s}{b} + \frac{\varepsilon E}{4\pi\delta_s} \cdot (\xi - \psi) \right) t. \quad (15)$$

Преобразовав уравнение (14) с учетом выражений (3, 15) будем иметь безразмерное уравнение пропитывания угольного агломерата при воздействии на него внешним электрическим полем

$$(x - x^2) dx = -d\tau_e, \quad (16)$$

с начальным условием

$$x(\tau_e = 0) = 1. \quad (17)$$

Проинтегрировав уравнение (16) с учетом начального условия (17), получим выражение для определения времени пропитывания угольного агломерата в безразмерном виде

$$\tau_e = \frac{1}{6}(2x^3 - 3x^2 + 1). \quad (18)$$

В уравнениях (18) и (7) правые части равны, следовательно, $\tau_e = \tau_h$ и степень пропитывания угольного агломерата x в двух рассматриваемых случаях будет определяться по выражению (8).

На рис. 1 представлена зависимость безразмерного времени пропитывания от степени пропитывания угольного агломерата, вычисленная по уравнению (7).

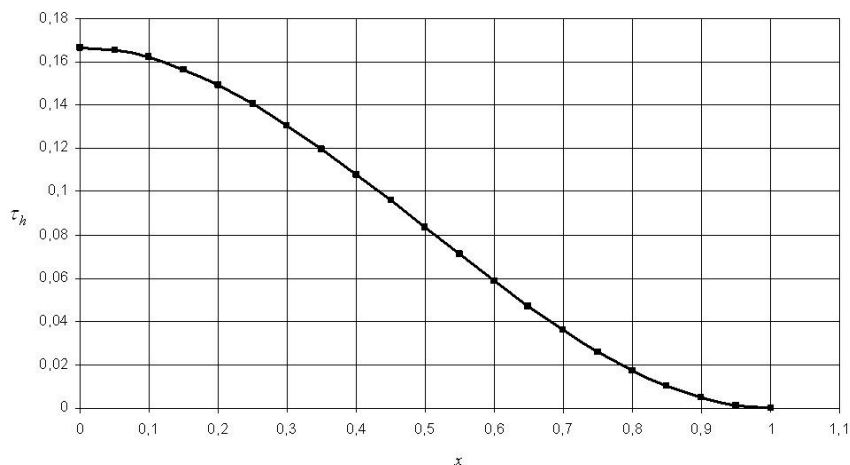


Рисунок 1 – Зависимость безразмерного времени пропитывания от степени пропитывания угольного агломерата

Зависимость степени пропитывания угольного агломерата от безразмерного времени процесса пропитывания, рассчитанная по выражению (8), изображена на рис. 2.

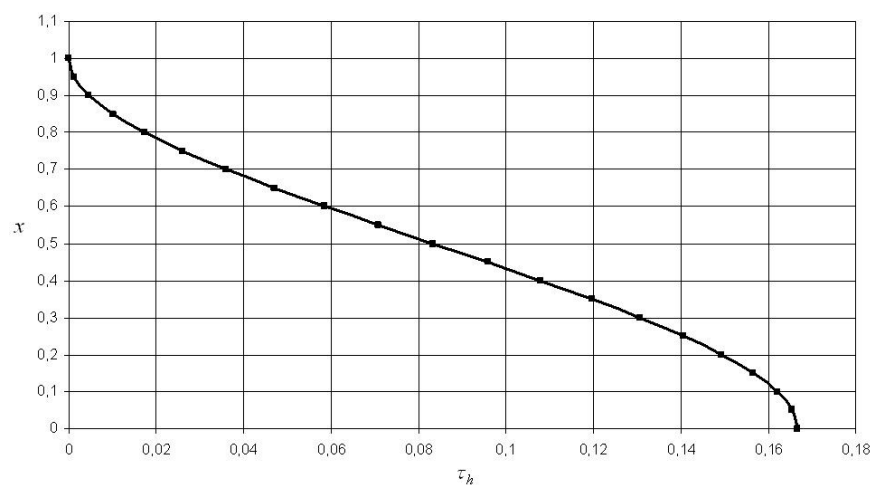


Рисунок 2 – Зависимость степени пропитывания угольного агломерата от безразмерного времени процесса

На рис. 2 видно, что на участке $0,2 \leq x \leq 0,8$ изменение степени пропитывания угольного агломерата от безразмерного времени процесса можно представить в виде линейной зависимости (рис. 3).

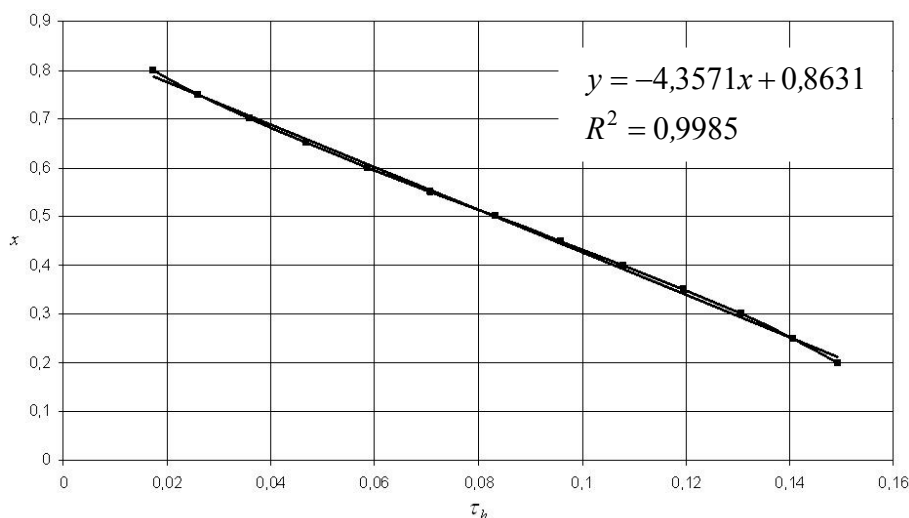


Рисунок 3 – Линейная аппроксимация степени пропитывания угольного агломерата от безразмерного времени процесса

В ходе исследования, выполненного в статье, были рассмотрены две математические модели процесса пропитывания угольных агломератов и получены зависимости для определения времени и степени пропитывания угольного агломерата. Данные зависимости позволяют обосновать параметры технологий приготовления водоугольного топлива при предварительном смешивании с разупрочнением угля поверхностно-активными веществами и дроблением с помощью электрогидравлического воздействия.

Список литературы

1. Семененко Е.В. Перспективы применения новых технологий приготовления и транспортирования водоугольного топлива / Е.В. Семененко, И.Ю. Козар // Сб. докладов XI Международной научно-технической конференции «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». – Екатеринбург, 2013. – С. 20-23.
2. Круть О.А. Водовугільне паливо. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
3. Баранов С.И. Интенсификация растворимости углей в органических растворителях / С.И. Баранов, Н.К. Неронин, Г.В. Самойленко // Изменение свойств угля при химических и физических воздействиях: сб. науч. трудов / Институт физико-органической химии и углехимии. – Киев, 1984. – С. 102 – 110 .
4. Семененко Е.В. Влияние параметров гидротранспорта на процесс пропитывания пористых транспортируемых агломератов // “Геотехническая механика. Разработка месторождений твердых полезных ископаемых”, Днепропетровск, 1997, Вып. 2. - С. 145 - 148.
5. Семененко Е.В. Математическое моделирование процесса пропитывания угольных агломератов / Е.В. Семененко, И.Ю. Козарь, К.К. Подоляк // Сб. докладов «Міждержавної науково-методичної конференції «Проблеми математичного моделювання» – Дніпродзержинськ, ДДГУ, 2013. – С. 83-85.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1973. – 832 с.
7. Хейфец Л.И., Несмак А.К. Многофазные процессы в пористых средах. – М.: Химия, 1982. – 320 с.