ДОПОВІДІ
НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ

7 • 2015

УДК 622.794

В. С. Білецький, О. А. Круть

Оцінка властивостей водовугільної суспензії у гідродинамічних умовах

(Представлено академіком НАН України А. Ф. Булатом)

Розглянуто поведінку водовугільної суспензії високої концентрації (ВУСВК) у динамічних умовах на основі фундаментальних уявлень теорії агрегативної стійкості ліофобних дисперсних систем (теорії ДЛФО). Дано оцінку отриманих результатів у порівнянні з практичними технічними характеристиками гідравлічного транспортування водовугільної суспензії.

Ключові слова: водовугільна суспензія, енергія потоку, седиментаційна стабільність.

Окремі результати аналізу базисних властивостей ВУСВК і тенденцій їх зміни із застосуванням теорії стійкості ліофобних дисперсних систем у коагульованій структурі в статичних умовах наведено в роботі [1]. Методичним підходом щодо розгляду поведінки ВУСВК у динамічних умовах при її гідравлічному транспортуванні у трубопроводах, на нашу думку, є порівняння енергій зв'язку частинок у коагуляційній структурі ВУСВК та зовнішньої енергії потоку рідини, спрямованої на розрив цього зв'язку. Сумарна енергія (E_c) взаємодії двох сферичних частинок в рідині визначається таким рівнянням [2]:

$$E_c(h) = 2\pi\varepsilon_0 r\varphi^2 \ln[1 + \exp(-\chi h)] - \frac{A_r}{12h}. \tag{1}$$

Тут ε_0 — абсолютна діелектрична проникність води ($\varepsilon_0 = 7{,}26 \cdot 10^{-10}$ Ф/м); r — радіус сферичних вугільних частинок, м; ϕ — потенціал дифузної частини подвійного електричного шару (ПЕШ) на поверхні вугільних частинок, В; χ — зворотний дебаївський радіус (обернене значення товщини дифузного шару δ), $\chi = 1/\lambda$, де λ — протяжність (довжина) дифузного шару ПЕШ (для більшості випадків $\lambda = 1 \cdot 10^{-8}$ м$^{-1}$); h — відстань між частинками твердої фази у суспензії; A_r — константа Гамакера, Дж.

Енергія потоку рідини може визначатися за формулою [3]:

$$E_\Pi = 0{,}5\alpha\rho\Delta V^3 St, \tag{2}$$

© В. С. Білецький, О. А. Круть, 2015

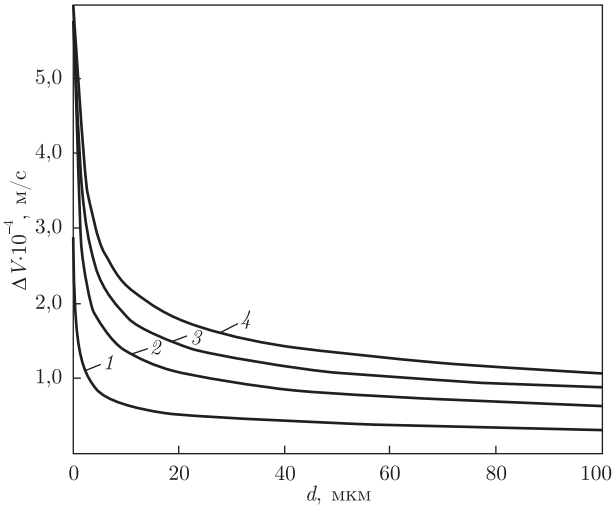

Рис. 1. Аналітичні залежності ΔV (d) у випадку фіксації чистинок у першому потенційному мінімумі при зміні потенціалу поверхні вугільних честинок в межах 50–20 мВ:
1 — 50 мВ; *2* — 100 мВ; *3* — 150 мВ; *4* — 200 мВ

де α — коефіцієнт Коріоліса; ρ — густина рідини (води); ΔV — різниця швидкостей потоків, які набігають на дві суміжні частинки у коагуляційній структурі ВУСВК; S — площа поперечного перерізу потоку, який набігає на окрему частинку; t — тривалість дії потоку.

Умовою руйнування коагуляційних структур ВУСВК є нерівність $E_{\text{п}} > E_c$.

Звідси критичне значення ΔV, при якому спостерігається руйнування парних коагуляційних зв'язків між частинками ВУСВК і які можуть перебувати у першому або другому мінімумі (потенційній ямі на кривій $E_c(\text{h})$) [1], можна записати так:

$$\Delta V = \sqrt[3]{\frac{E_c}{0{,}5\alpha\rho St}}. \tag{3}$$

Для розрахунків за першим мінімумом: значення константи Гамакера (A) для поверхні частинок ВУСВК за [4] можна прийняти $1 \cdot 10^{-19}$ Дж; відстань між частинками у коагуляційній структурі (незворотна коагуляція) $h = 2$ нм, що відповідає інтервалу відстаней між частинками у першому потенційному мінімумі; діапазон крупності вугільних частинок ВУСВК і, відповідно, діаметра набігаючого на них потоку рідини $d = 2r = 1 \div 100$ мкм; діапазон зміни поверхневого потенціалу вугільних і мінеральних частинок вибраний у межах 50–200 мВ [4]; коефіцієнт Коріоліса $\alpha = 1{,}15$ [3]; густина води $\rho = 1000$ кг/м^3.

Одержані для цих умов криві $\Delta V(d)$ наведено на рис. 1. Вони добре ілюструють дві тенденції, характерні для дисперсних систем.

По-перше, зростання потенціалу поверхні вугільних зерен приводить до зміцнення коагуляційних структур, що потребує, в свою чергу, більшої енергії потоку рідини для їх руйнування. Так, наприклад, для частинок крупністю $d = 20$ нм при зростанні потенціалу поверхні з 50 до 200 мВ критичне значення ΔV зростає майже у чотири рази.

По-друге, чітко простежується залежність ΔV від крупності частинок. Причому в області надтонких частинок значення ΔV, при якому спостерігається руйнування парних коагуляційних зв'язків між суміжними частинками ВУСВК, різко зростає. Це відповідає класичним уявленням про колоїдні дисперсні системи. Чим менше крупність твердої фази

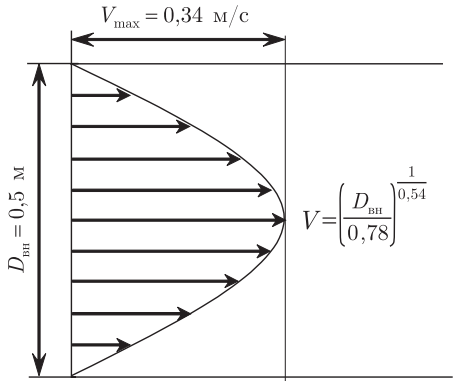

Рис. 2. Епюра швидкостей для ВУСВК у трубопровідній системі "Бєлово–Новосибірськ"

ВУСВК, тим більш міцними є коагуляційні зв'язки між частинками у першому потенційному мінімумі.

Для практики приготування та транспортування ВУСВК важливим питанням є стабільність експлуатаційних характеристик суспензії і визначення умов, при яких незворотні коагуляційні структури можуть руйнуватися.

ВУСВК транспортується у магістральних трубопроводах у ламінарному режимі течії [5]. Епюра швидкостей для ВУСВК у трубопроводі "Бєлово–Новосибірськ" показана на рис. 2. Внутрішній діаметр магістрального трубопроводу складав 0,5 м. Максимальна швидкість потоку — 0,34 м/с. Методом регресійного аналізу, виконаного за допомогою програми TableCurve 2D, отримана залежність для епюри швидкостей:

$$V = \left(\frac{d}{0{,}78}\right)^{1/0{,}54}. \tag{4}$$

Розрахунки за рівнянням (4) показують, що реальне значення ΔV у трубопроводі при контакті частинок крупністю 100 мкм в області максимальних градієнтів швидкості потоку (на відстані 10–15 см від осі потоку) становить $5{,}8 \cdot 10^{-5}$ м/с. У той же час, згідно з рис. 2, критичне значення ΔV для частинок тієї ж крупності становить $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м/с, що майже на два порядки більше за реальне значення ΔV.

Таким чином, при утворенні у трубопроводі незворотних коагуляційних структур (у першому потенційному мінімумі) вони не будуть руйнуватися ламінарним потоком суспензії. Це буде призводити до осідання частини твердої фази, порушення гомогенності системи і погіршання агрегаційної стійкості та реологічних властивостей ВУСВК. Відновлення попередніх (до утворення коагуляційних структур) характеристик ВУСВК можливе у турбулентних потоках, в яких буде перевищено критичне значення ΔV (наприклад, у насосах).

Другим важливим аспектом є дослідження властивостей тиксотропних структур ВУСВК, утворених завдяки фіксації вугільних частинок у другому потенційному мінімумі. Як відомо [2], енергія зв'язку між частинками у другій потенційній "ямі" на 1–2 порядки менша, ніж при фіксації частинок у першій "ямі".

Для розрахунків та побудови кривої $\Delta V(d)$ за другим потенційним мінімумом приймаємо ті ж значення параметрів, за виключенням відстані між частинками. За даними наших попередніх досліджень, фіксація частинок ВУСВК у другому потенційному мінімумі спо-

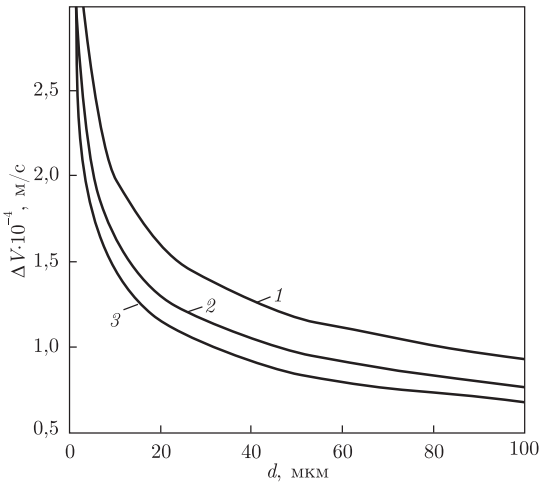

Рис. 3. Аналітичні залежності ΔV (d) у випадку фіксації частинок у другому потенційному мінімумі при відстанях між ними: *1* — 50 мВ; *2* — 100 мВ; *3* — 150 мВ

стерігається на відстанях $h = 50 \div 150$ нм. На рис. 3 показані одержані за рівнянням (3) криві $\Delta V(d)$ для другого потенційного мінімуму.

Як видно, при збільшенні відстані між частинками критичне значення ΔV, яке відповідає руйнуванню парних коагуляційних зв'язків між суміжними частинками ВУСВК, зменшується.

Причому критичне значення ΔV для частинок крупністю 50–100 мкм становить $(5-9) \times$ $\times\, 10^{-5}$ м/с, що практично збігається з реальними значеннями ΔV у трубопроводі в області максимальних градієнтів швидкості потоку (на відстані 10–15 см від осі потоку) — $5{,}8 \cdot 10^{-5}$ м/с. Критичне значення ΔV для частинок крупністю менше 30 мкм перевищує реальне значення ΔV у трубопроводі.

Таким чином, у магістральному гідротранспортному трубопроводі зворотні коагуляційні структури (у другому потенційному мінімумі) у випадку частинок ВУСВК крупністю 50–100 мкм знаходяться на межі руйнування ламінарним потоком суспензії. Ці ж структури на основі частинок крупністю менше 30 мкм не руйнуються ламінарним потоком суспензії в області максимальних градієнтів швидкості потоку.

Оскільки градієнти швидкості потоку в пристінних шарах і в центральній області потоку значно менші (див. рис. 2), то ймовірність збереження тиксотропної структури ВУСВК у цих зонах істотно більша.

Запропонований методичний підхід може бути застосований і для ланцюжків зерен тиксотропної структури ВУСВК.

На закінчення такі висновки.

1. Обгрунтовано можливість застосування теорії ДЛФО для оцінки механізму агрегативної стійкості ВУСВК у гідродинамічних умовах. Для умов реального магістрального гідротранспорту ВУСВК показано, що тиксотропна структура, в якій вугільні частинки крупністю 50–100 мкм фіксовані у другому потенційному мінімумі, у ламінарному режимі течії знаходиться на межі руйнування в зоні максимальних градієнтів швидкостей. Ця ж структура, утворена частинками крупністю менше 30 мкм, у зазначеній зоні градієнтів швидкостей не руйнується. По перерізу потоку ймовірно спостерігається збереження тиксотропної структури ВУСВК у пристінній та центральній зонах ламінарного потоку.

У випадку фіксації частинок у першому потенційному мінімумі міцність їх зв'язку не дозволяє ламінарному потоку суспензії руйнувати ці структури у всьому досліджуваному діапазоні крупності та потенціалу поверхні твердої фази ВУСВК. Це обумовлює ефект "старіння" ВУСВК і необхідність для відновлення попередніх її характеристик турбулентного перемішування, наприклад, у насосах.

Цитована література

1. *Білецький В. С., Крутъ О. А., Сергєєв П. В.* Водовугільна суспензія з позиції теорії агрегативної стійкості ліофобних дисперсних систем // Доп. НАН України. – 2013. – № 5. – С. 95–103.
2. *Новый* справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия. – Ст.-Петербург: НПО "Профессионал", 2006. – 900 с.
3. *Чугаев Р. Р.* Гидравлика. – Ленинград: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
4. *Байченко А. А.* Научные основы и интенсивная технология очистки шламовых вод углеобогащения. – Дис. ... д-ра техн. наук. Кемерово. – 1987. – 478 с.
5. *Світлий Ю. Г., Білецький В. С.* Гідравлічний транспорт. – Донецьк: Східний вид. дім, 2009. – 436 с.

References

1. *Bilecky V. S., Krut' O. A., Sergeev P. V.* Dopov. NAN Ukraine, 2013, No 5: 95–103 (in Ukrainian).
2. *The new* handbook of chemists and technologists. Electrode processes. Chemical kinetics and diffusion. Colloid chemistry, Sankt-Petersburg: NPO "Professional", 2006 (in Russian).
3. *Chugaev R. R.* Hydraulics, Leningrad: Energoizdat, 1982 (in Russian).
4. *Baychenko A. A.* Scientific bases and intensive cleaning technology water slurry coal preparation, Dis. ... dokt. tekhn. nauk, Kemerevo, 1987 (in Russian).
5. *Svitliy Y. G., Bilecky V. S.* Hydraulic transport, Donetsk: Skhidny vydavnychy dim, 2009 (in Russian).

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ

Надійшло до редакції 03.03.2015

В. С. Билецкий, А. А. Круть

Оценка свойств водоугольной супензии в гидродинамических условиях

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев

Рассмотрено поведение водоугольной суспензии высокой концентрации (ВУСВК) в динамических условиях на основе фундаментальных представлений теории агрегативной стойкости лиофобных дисперсных систем (теории ДЛФО). Дана оценка полученных результатов по сравнению с практическими техническими характеристиками гидравлического транспортирования водоугольной смеси.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, энергия потока, седиментационная стабильность.

V. S. Bilecky, O. A. Krut'

The evaluation of properties of coal water slurries under hydrodynamic conditions

Coal Energy Technology Institute of the NAS of Ukraine, Kiev

The behavior of high-concentration coal water slurry (CWS) under dynamic conditions has been considered on the basis of fundamental assumptions of the theory of aggregated stability of lyophobic dispersed systems. The obtained results have been compared with the applied technical characteristics of hydraulic transport of CWS.

Keywords: coal water slurry, energy flow, sedimentation stability.