

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук,

Н.В. СУРГОВА

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

БЛИЗЬКА І ДАЛЕКА ГІДРОДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ У ПРОЦЕСАХ СЕЛЕКТИВНОЇ АГРЕГАЦІЇ ВУГІЛЛЯ ГІДРОФОБНИМИ РЕАГЕНТАМИ

Постановка проблеми. Традиційні методи збагачення вугілля – флотація, відсадка, важкосередовищна сепарація, а також гвинтова сепарація та концентрація на столах малоефективні для тонкого матеріалу крупністю менше 50-30 мкм. Розробка високоефективних технічних рішень, які забезпечують вилучення з пульпи ультратонких класів вугілля – одна з найбільш актуальних проблем вуглезбагачення [1, 2].

Аналіз досліджень і публікацій. Перспективним методом підготовки тонкодисперсного вугілля 0-100(50) мкм до флотації є його селективна агрегація (флокуляція, агломерація) гідрофобними реагентами. У роботах Г. Румпфа, Д. Невітта, А. Єлішевича, В. Білецького, Ю. Папушина, С. Сергєєва [1, 3-5] розглянута адгезійна гіпотеза селективної агрегації гідрофобних матеріалів. Термодинамічна гіпотеза висунута В. Шилаєвим та М. Ніколаєвим. "Амальгамна" гіпотеза розвинута А. Єлішевичем та Ю. Папушиним. "Коалесценра" гіпотеза висунута В. Шилаєвим та М. Ніколаєвим, потім розвинута В. Білецьким та П. Сергєєвим. Масово-статистичну гіпотезу селективної агрегації обстоює П. Сергєєв. Разом з тим, найбільш продуктивним підходом до аналізу процесу селективної агрегації вугілля є феноменологічний, який застосовується, зокрема в роботах В. Білецького, Ю. Папушина, П. Сергєєва, А. Кхелуфі, В. Залевського та ін.

Мета роботи – розгляд і аналіз близької і далекої гідродинамічної взаємодії у процесах селективної агрегації вугілля гідрофобними реагентами.

Виклад основного матеріалу. Феноменологічна модель селективної агрегації включає як основний субпроцес елементарний акт контакту реагенту-зв'язуючого та вугільних зерен. Основні фази контакту об'єктів – вугільних зерен та крапель реагенту: "зустріч" – "зближення" – "прорив водної плівки" – "розтікання реагенту". Для визначення ефективності зіткнень агрегатоутворюючих об'єктів важливо окремо розглянути їх близьку і далеку гідродинамічну взаємодію (БГВ та ДГВ), що є домінуючими факторами у фазах "зустріч" та "зближення".

Близька гідродинамічна взаємодія агрегатоутворюючих об'єктів визначається властивостями тонких поверхневих шарів води, які можуть бути двох принципово різних типів – зі зменшеною та збільшеною тангенсійною рухливістю молекул води. Перші мають місце на гідрофільних поверхнях, другі – на гідрофобних. Так як для поверхні агрегатоутворюючих компонент (вугілля та зв'язуючого) характерний великий діапазон проміжних етапів та

Флотація

гідрофільно-гідрофобна мозаїчність, нам необхідно розглянути обидва ці типи. У першому випадку диполі води орієнтуються перпендикулярно поверхні речовини. Товщина цього шару може досягати 1-100 мкм. В ньому вода має підвищену в декілька разів в'язкість, дещо більшу густину, знижену розчинну здатність та діелектричну проникність, збільшений порівняно з об'ємною фазою тиск ($P_h > P_0$). При підвищенні температури товщина аномального шару зменшується, особливо різко при 65-70° (до моношару молекул води). Згідно теорії нерозчинного об'єму Б.Дерягіна, збільшення концентрації розчинюваної речовини призводить до потоншення плівки води. За даними [6] руйнування особливої структури граничних шарів води починається при концентрації електrolіту $>10^{-2}$ моль/л. Стійкість товстих β -плівок (рис. 1) визначається в основному дальнодіючими електростатичними силами, тобто фактором подвійного електричного шару (ПЕШ).

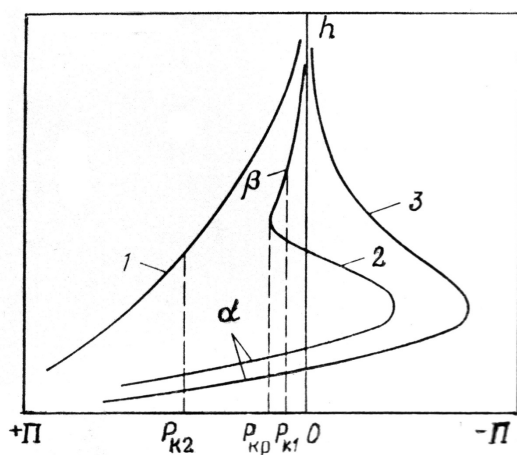


Рис. 1. Ізотерми розклинюючого тиску змочуючих плівок
(за Б.В. Дерягіним та М.В. Чураєвим):

h – товщина плівки; Π – розклинюючий тиск. 1 – товсті (~100 нм) стабільні плівки, хороша змочуваність; 2 – товсті метастабільні β -плівки, які при прориві переходять у тонкі (~10 нм) термодинамічно стійкі α -плівки; 3 – тонкі α -плівки (~1 нм), погана змочуваність

Останнє особливо важливе для розуміння впливу рН-регулятора на процес СМА. В другому випадку диполі води орієнтуються паралельно поверхні речовини. Вода в граничному шарі має на порядок меншу в'язкість, зменшений порівняно з об'ємною фазою тиск ($P_h < P_0$) [6].

Таким чином, БГВ агрегатоутворюючих об'єктів в процесі селективної масляної агрегації (СМА) вугілля залежить від гідрофобно-гідрофільних властивостей поверхонь об'єктів, рН водного розчину, його температури t_c , твердості води. Цей висновок добре підтверджується зафіксованим впливом рН-регуляторів на результати СМА вугілля (рис. 2), а також ефектом суттєвого прискорення агрегації при збільшенні температури пульпи (рис. 3).

При $P_h > P_0$ БГВ перешкоджає, а при $P_h < P_0$ сприяє контакту агрегатоутво-

рюючих часточок. Кількісною оцінкою БГВ є розклинюючий тиск $\Pi(h) = P_h - P_0$, який при $P_h < P_0$ є мірою гідрофобної взаємодії. В першому наближенні, вважаючи вклад сил різної природи в розклинюючий тиск адитивним, для $\Pi(h)$ в загальному випадку маємо [7]:

$$\Pi(h) = \Pi_e(h) + \Pi_m(h) + \Pi_s(h) + \Pi_a(h) + \Pi_c(h), \quad (1)$$

де Π_e – йонна-електростатична складова, пов'язана з перекриттям дифузних йонних шарів; Π_m – молекулярна складова, обумовлена силами дисперсійної взаємодії міжфазних зон, в яких тензор флуктуаційного електромагнітного поля анізотропний; Π_s – структурна складова, викликана перекриттям граничних шарів рідини зі зміжною структурою; Π_a – адсорбційна складова, пов'язана з перекриттям дифузних адсорбційних шарів нейтральних молекул в нейонних розчинах; Π_c – складова, обумовлена "стеричною" взаємодією адсорбційних шарів ПАР або полімерів.

Дальність дії БГВ визначається, очевидно, найбільш дальнодіючою складовою $\Pi_c(h)$ і оцінюється $\approx 200-300$ нм. Всі фактори, які спричиняють руйнування аномального граничного шару води при $\Pi(h) > 0$, сприяють зменшенню БГВ і, отже, сприяють процесу селективної агрегації ультратонких вугільних зерен. До таких факторів, крім перерахованих вище, належить також перепад температур Δt_c між середовищем та агрегатоутворюючими об'єктами. Чим більше Δt_c , тим більший потік енергії "об'єкт-середовище", який "розмиває" граничний шар і зменшує БГВ. Це пояснює спостерігаємий ефект прискорення агрегації при збільшенні Δt_c .

Суттєвим чинником, який зменшує БГВ, є, очевидно, також форма зерен. Так як товщина аномального шару води на гранях і ребрах потоншується, то імовірність агрегації "кутастих" зерен збільшена.

Далека гідродинамічна взаємодія агрегатоутворюючих об'єктів полягає в тому, що крупна частинка (вугільне зерно, крапля зв'язуючого) викривляє лінії току води в ламінарному режимі течії і таким чином змінює траєкторію малих частинок (рис. 4), утруднюючи їх контакт з крупним об'єктом. Нас цікавлять два моменти: по-перше, крупність зерен, що "ухиляються" від зустрічі (і таким чином – від агрегації); по-друге, способи нейтралізації негативного впливу ДГВ на агрегацію дрібних частинок. Розглянемо їх послідовно.

Для ефективності зіткнень за [7] маємо

$$E_3 = \lambda^2 (\lambda + 0,5)^{-2}, \quad (2)$$

де λ – критерій Стокса; $\lambda = l_i/R$, де l_i – відстань, яку мала частинка радіусу r спроможна подолати за рахунок початкової швидкості $V_{п}$, $l_i = 2V_{п} \cdot r^2(\rho_b - \rho_0) / 9\nu$.

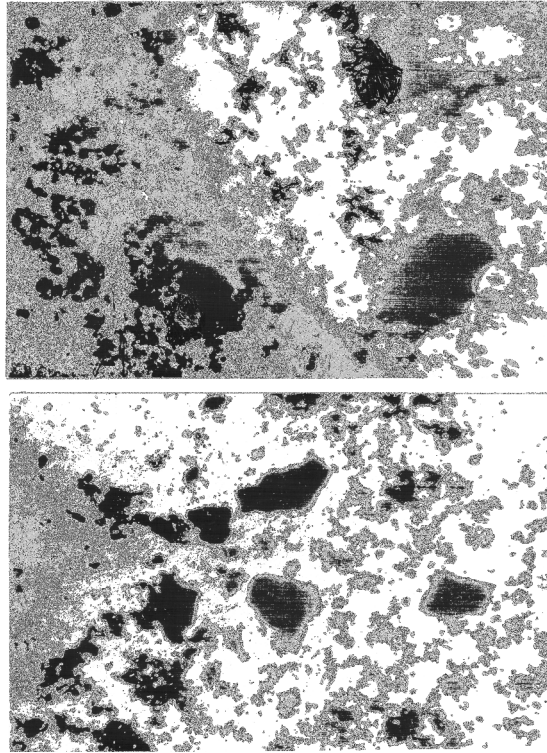


Рис. 2. Фрагмент осаду антрацитно-породної суспензії: нижнє фото: рН=3 – відсутність флокуляції; верхнє фото: рН=10,5 – активна флокуляція. Фото Ю.Л. Папушина

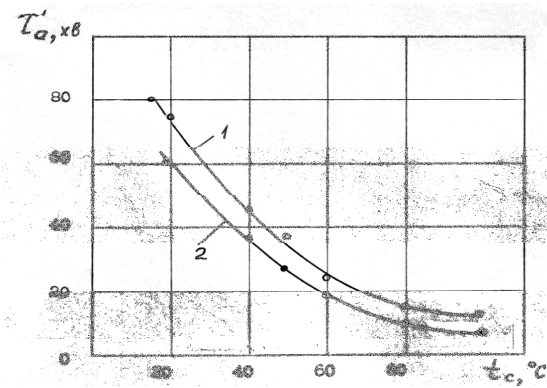


Рис. 3. Експериментальні залежності тривалості τ'_a утворення вуглемасляних агрегатів від температури середовища t_c . Вихідне вугілля – марки Г, 0 – 0,1 мм. рН=11, рН-регулятор NaOH; 1 – чотирилопатевий імпелер; 2 – імпелер типу "біляче колесо"; $n_b=25 \text{ c}^{-1}$

З іншого боку для E_3 маємо [8]:

$$E_3 \approx 3 \frac{r}{R}, \quad (r \ll R), \quad (3)$$

де r , R – радіуси малої і великої частинки.

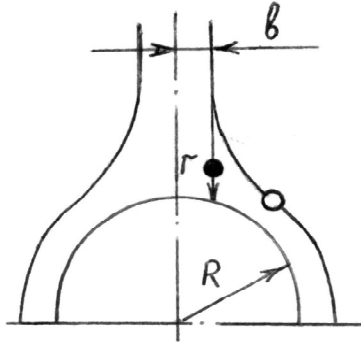


Рис. 4. До механізму зустрічі агрегатоутворюючих об'єктів у водному середовищі: зміна траєкторії малих частинок під дією далекої гідродинамічної взаємодії (ДГВ)

Використовуючи рівняння (2) та (3) для критичного радіусу $r_{кр}$, при перевищенні якого має місце механізм інерційного зіткнення частинки і об'єкту, одержуємо:

$$r_{кр} = \frac{1}{3} \lambda_{кр}^2 (\lambda_{кр} + 0,5)^{-2} \cdot R \quad (4)$$

Враховуючи, що $\lambda_{кр} = 1/24$ [8] для $R=3$ і 1 мм, маємо відповідно $r_{кр} = 6$ і 2 мкм. Вугільні зерна $r < 6$ мкм у фугаті центрифуги НОГШ-325 ($F_r = 2000$, аналог супер-декантер центрифуги фірми PENVOLT) за нашими даними складають $\sim 50\%$. Для таких тонких матеріалів, як сажі, $r \leq 1$ мкм. Все це свідчить про можливий серйозний вплив ДГВ на результати селективної агрегації тонких матеріалів, що обумовлює актуальність нейтралізації ДГВ.

Так, для турбулентного режиму течії у [8] одержано:

$$E_{з.турб} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot j_{турб}}{\pi \cdot R^2 \cdot u(r) \cdot n_0} \quad (5)$$

де n_0 – середнє число частинок в одиниці об'єму; $j_{турб}$ – потік тонких частинок діаметра r на поверхню частинки R ; $u(r)$ – швидкість частинки r . Аналізуючи рівняння (5), В. Левіч [8] показав, що при турбулентному режимі і $r=1-10$ мкм $E_{з.турб} \approx 1$. Це свідчить про велику роль турбулентної дифузії, яка практично згладжує негативний вплив ДГВ.

Розглядаючи рівняння (5), зупинимося на параметрі $j_{турб}$. В результаті тангенціальної рухливості поверхні краплі зв'язуючого, тобто різних граничних умов для поверхні вугільного зерна $V_{кр} = 0$, і краплі реагента (зв'язуючого)

$V_{зв}^n \neq 0$, за даними [8] $j_{турб}^{зв} \gg j_{турб}^{зр}$. Відси $E_{з.турб}^{зв} \gg E_{з.турб}^{зр}$. Підвищена ефек-

Флотація

тивність зіткнень $E_{з,турб}^{зв}$ може, на наш погляд, пояснювати різкий сплеск агрегаційної активності на початку перемішування водо-масло-вугільної суспензії, описаної в [1]. Але слід зазначити, що при зменшенні розміру крапель зв'язуючого, а також при збільшенні концентрації ПАР $V_{зв}^п \rightarrow 0$ [8], тобто часточки надтонкої емульсії уподібнюються твердим мінеральним зернам що, очевидно, обумовлює існування *оптимальних або мінімально припустимих розмірів часточок емульсії масляного зв'язуючого* та концентрації ПАР (з точки зору ефективності їх зіткнення з зернами вугілля, наприклад, в процесі селективної агрегації).

Збільшення числа Re до 2000...3000 (розвинена турбулентність) є засобом нейтралізації негативного впливу далекої гідравлічної взаємодії (ДГВ) на агрегацію дрібних частинок вугілля $r \leq 1...6$ мкм. При $Re \geq 2000...3000$ можна вважати, що кожна зустріч часточок r та R розрахована на основі прямолінійних траєкторій призводить до їх фактичної зустрічі та подальшого імовірного злипання. Такий висновок експериментально підтверджується кривою $\tau_a(n_b)$, яка свідчить про активізацію агрегатоутворення з ростом $n_b \sim Re$ (рис. 5).

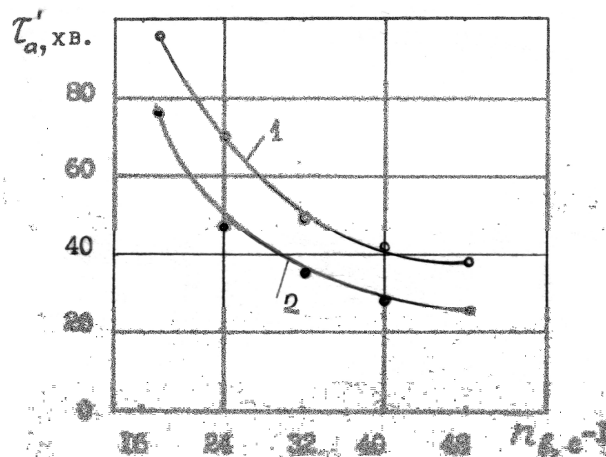


Рис. 5. Експериментальні залежності $\tau'_a(n_b)$
(умови одержання див. рис. 2)

Висновки

1. Близька і далека гідродинамічна взаємодія – домінуючі фактори у фазах "зустріч" та "зближення", що вирішальним чином впливають на процес селективної агрегації вугілля гідрофобними реагентами.

2. Близька гідродинамічна взаємодія агрегатоутворюючих об'єктів визначається властивостями тонких поверхневих шарів води і залежить від гідрофобно-гідрофільних властивостей поверхонь об'єктів, рН водної фази, її температури t_c , твердості води. Кількісною оцінкою БГВ є розклинюючий тиск. Дальність дії БГВ визначається оцінюється $\approx 200-300$ нм.

3. Далека гідродинамічна взаємодія агрегатоутворюючих об'єктів полягає в тому, що крупна частинка викривляє лінії току води (особливо в ламінарному

режимі течії) і таким чином змінює траєкторію малих частинок, утруднюючи їх контакт з крупним об'єктом (зерном більшого діаметру, бульбашкою повітря). Це суттєво утруднює флотацію та селективну агрегацію ультратонких гідрофобних зерен. Засобом нейтралізації негативного впливу далекої гідравлічної взаємодії (ДГВ) є збільшення числа Re до 2000...3000 (розвинена турбулентність). Турбулентна дифузія ультратонких зерен до об'єкта більшого діаметра практично згладжує негативний вплив ДГВ.

4. Далека гідродинамічна взаємодія, очевидно, обумовлює існування оптимальних або мінімально припустимих розмірів часточок емульсії аполярного реагенту та концентрації ПАР з точки зору ефективності їх зіткнення з зернами вугілля, наприклад, в процесі селективної агрегації, що може бути предметом подальших досліджень.

Крім того, у подальшому слід зупинитися на детальному вивченні власне механізму зустрічі та контакту вугільних зерен між собою, крапель реагенту і вугільних зерен, а також закріпленні реагенту на вугільній поверхні.

Список літератури

1. Білецький В.С., Сергєєв П.В., Папушин Ю.Л. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля. – Донецьк: Грань, 1996. – 264 с.
2. Нікітін І.М. Селективна флокуляція вугільних шламів латексами. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2001. – 152 с.
3. Rumpf H. Die Wissenschaft des Agglomerierens // Chemie-Ingenieur-Technik. – 1974 – № 1. – S. 1-11.
4. Newitt D.M. Contribution to the theory and practice of granulation // Trans. Inst. Chem. Eng. – 1958. – v. 36. – p. 422-442.
5. Папушин Ю.Л. Масляная агломерация высокозольного антрацитового топлива. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1987. – 16 с.
6. Дерягин Б.В. Вода в дисперсных системах. – М.: Химия, 1990. – 286 с.
7. Духин С.С., Рулев Н.Н., Димитров Д.С. Коагуляция и динамика тонких пленок. – К.: Наук. думка, 1986. – 226 с.
8. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Издат. физ.-мат. литер., 1959. – 700 с.
9. Левин Л.И. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. – М.: Из-во АН СССР, 1961. – 267 с.

© Белецкий В.С., Сургова Н.В., 2011

*Надійшла до редколегії 18.04.2011 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.І. Назимко*