

**АНАЛІЗ СИЛ ЗЧЕПЛЕННЯ ВУГІЛЬНИХ  
ЗЕРЕН ПРИ СЕЛЕКТИВНІЙ МАСЛЯНІЙ  
АГРЕГАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ ШЛАМІВ**

© 2011 Білецький В.С., д.т.н.,  
Сергєєв П.В., д.т.н. (ДонНТУ)

*У статті розглянуті закономірності структуроутворення в процесах масляної агрегації вугільних шламів. Основну увагу приділено адгезійним, когезійним та капілярним силам зчеплення.*

*The article deals with the regularities of structure formation in the processes of aggregation of oil-coal slurry. Emphasis is placed on the adhesive, cohesive and capillary forces of adhesion.*

Ключові слова: масляна агрегація, вугільні шлами, адгезія, когезія, капілярні сили зчеплення.

Одним з спеціальних процесів збагачення вугільних шламів є селективна масляна агрегація, яка поєднує сукупність процесів структурування тонкої полідисперсної вугільної фази у водному середовищі за допомогою масляних реагентів. В основі процесів селективної масляної агрегації вугілля лежить механізм адгезійної взаємодії олеофільної вугільної поверхні з маслами, в результаті якого досягається її селективне змочування і агрегування в турбулентному потоці води. Гідрофільні часточки, не змочувані маслом, до складу агрегатів не входять, що дозволяє виділяти їх у вигляді породної суспензії.

В залежності від режимних параметрів, технологічної схеми, результату (зокрема – виду продукту агрегації) виділяють масляну грануляцію (МГ), агрегацію (МА) та флокуляцію (МФ). При грануляції та агрегації до процесу залучаються зерна вугілля крупністю до 3-5 мм, а при флокуляції – не більше від 0,1-0,2 мм. Гранулят являє собою моно- або полідисперсний сипучий продукт, який складається з кулькоподібних і овальних гранул крупністю від 0,5-0,7 до 7-10 мм. Агрегат – це частково згранульоване полідисперсне вугілля, представлене вуглемасляними комплексами крупністю від 0,2-0,3 мм до  $(1,1-1,3)d_{\max}$

( $d_{\max}$  – максимальний діаметр вугільного зерна). Флокули – пухкі або ушільнені вугле-зв'язуючі комплекси крупністю не більше від 0,2-0,3 мм. [1-5]. Процес масляної агрегації застосовувався зокрема для збагачення і зневоднення коксівного вугілля на Губахінському і Авдіївському коксохімічних заводах [6-9].

У теоретично-прикладному плані стоїть питання визначення сил зчеплення вугільних зерен у вуглемасляних агрегатах, які визначають їх міцність, і, отже, можливість видалення та зневоднення.

Мета цієї роботи – визначення і аналіз закономірностей структуроутворення в процесах масляної агрегації вугільних шламів, встановлення основних сил зчеплення вугільних зерен у агрегатах різних типів.

Узагальнення результатів виконаних експериментальних досліджень вугільних агрегатів та близько 200 аншліфів агрегатів, гранул, флокул дозволили виділити такі основні типи структур вугільних агрегатів (рис. 1):

- 1 – ушільнені утворення, характерні наявністю тонких граничних плівок зв'язуючого матеріалу між окремими зернами;
- 2 – структури з ввігнутими менісками зв'язуючого між зернами вугілля на поверхні агрегату;
- 3 – краплі зв'язуючого, заповнені вугільними зернами;
- 4 – пухкі утворення (скупчення) вугільних зерен, зв'язані місточками зв'язуючої речовини.



Рис. 1 Основні типи структур вугільних агрегатів

Розглянемо сили зчеплення вугільних зерен у агрегатах різних структурних типів.

Сила аутогезійного зчеплення вугільних зерен в агрегатах I та IV типу  $F_a^{I,IV}$  в загальному випадку визначається капілярною  $F_k$  та когезійною  $F_{ко}$  складовою, силою Ван-дер-Ваальсових взаємодій вугільних зерен  $F_m$  та розклинюючою силою  $F_p$  тонких шарів зв'язуючого:

$$F_a^{I,IV} = F_k + F_{ко} + F_m - F_p \quad (1)$$

Позначимо  $l_b$  відстань між вугільними зернами, а  $h_a$  – товщину граничного (структурованого) шару реагенту-зв'язуючого на вугільній поверхні (кількісно  $h_a$  для різних реагентів – таких, як гас, мазут, флотореагент ААР, полімери бензолного відділення КХЗ – знаходиться у межах 0,01-1,0 мкм). При  $l_b > 2h_a$  відсутні молекулярна, адсорбційна, структурна та стерична складові  $F_p$  [10]. Електростатичну складову цієї сили можна не враховувати внаслідок, по-перше, аполлярності зв'язуючого [11], а по-друге, стікання зарядів у

водному середовищі. Тому  $F_p \cong 0$ . За нашими мікроскопічними дослідженнями відстані між вугільними зернами в агрегатах I типу, як правило, більші 1-2 мкм, тоді як основна складова Ван-дер-Ваальсових сил – дисперсійна – починає діяти на відстанях близько 0,5-0,85 нм [10]. Це дає можливість знехтувати фрагментарними випадками  $l_b < 0,85$  нм і прийняти  $F_M \cong 0$ . Отже,  $F_a^I$  визначається силами  $F_k$  та  $F_{ко}$ .

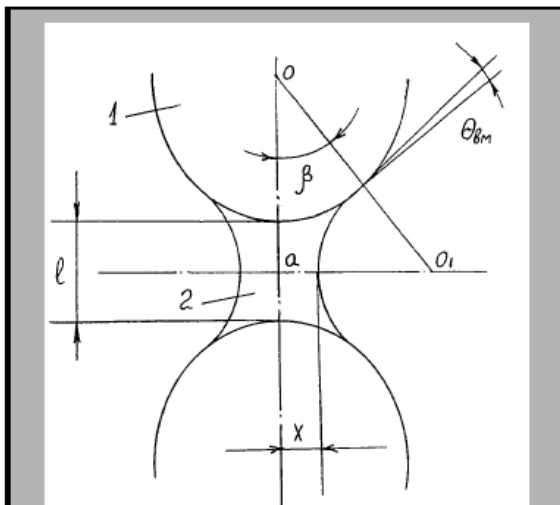


Рис. 2 До розрахунку сил аутогезійного зчеплення омаслених вугільних зерен: 1 – вугільне зерно 2 – зв'язуюча речовина

Згідно [12] для сферичних зерен

$$F_k^{сф-сф} = \frac{2\pi \cdot \sigma_n \cdot r \cdot k_m \cdot \cos \theta_{вм}}{1 + \operatorname{tg} \beta / 2} \cdot \cos \theta_{вм} \quad (2)$$

для сферичного зерна і площини

$$F_k^{сф-пл} = 2F_k^{сф-сф} \quad (3)$$

де  $\sigma_n$  – поверхневий натяг зв'язуючого;  
 $r$  – радіус зерна;

$k_m$  – коефіцієнт шорсткості, який визначається через середню крутизну мікрорельєфу поверхні  $\gamma_m$ :  $k_m = 1 / \cos \gamma_m$ ;

$\beta, \theta_{вм}$  – згідно рис. 2.

Слід підкреслити, що для зерен  $R \gg r$  міцність їх капілярного зв'язку вдвоє більша, ніж для рівновеликих зерен.

Для когезійної складової сил зчеплення маємо:

$$F_{ко} = \beta_{ко} \cdot S_{ко} \quad (4)$$

де  $\beta_{ко}$  – когезійне напруження зв'язуючого;

$S_{ко}$  – площа поверхні між зернами, через яку передається когезійне напруження.

Розглядаючи трикутник  $OO_1a$  (рис. 2.), можна показати, що

$$x = r \cdot f(\beta) \quad (5)$$

$$\text{де } f(\beta) = \begin{cases} \left[ (\operatorname{Sec} \beta - 1)^2 + 2(\operatorname{Sec} \beta - 1) \right]^{0,5} - (\operatorname{Sec} \beta - 1); & l_b \ll r \\ \left[ (1,5 \operatorname{Sec} \beta - 1)^2 + 2(1,5 \operatorname{Sec} \beta - 1) - 1,25 \right]^{0,5} - (1,5 \operatorname{Sec} \beta - 1); & l_b \ll r \end{cases} \quad (6)$$

Тоді:

$$S_{ко} = \pi \cdot x^2 = \pi \cdot r^2 \cdot k_\beta, \quad k_\beta = [f(\beta)]^2 \quad (7)$$

$$F_{ко} = \beta_{ко} \cdot \pi \cdot r \cdot k_\beta \quad (8)$$

Отже, при  $l_b > 2h_a$  для  $F_a^{I,IV}$  маємо:

$$F_a^{IV} = \frac{2\pi \cdot \sigma_n \cdot r \cdot k_m \cdot \cos \theta_{вм}}{1 + \operatorname{tg} \beta / 2} \cdot \cos \theta_{вм} + \beta_{ко} \cdot \pi \cdot r \cdot k_\beta \quad (9)$$

При  $l_b \leq 2h_a$  суттєву роль у зчепленні омаслених вугільних зерен починає відігравати розклинюючий тиск  $F_p$  зв'язуючого. При  $l_b \leq 2h_a$  розгорнутий вираз (1) має вигляд

$$F_a^{IV} = \frac{2\pi \cdot \sigma_n \cdot r \cdot k_m \cdot \cos \theta_{zm} + \beta_{ko} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot k_\beta - \left[ \frac{e_b}{8\pi} (E_h^2 - E_0^2) + A_0 / 6\pi h_a^3 + k / S_m \cdot h_a^2 (h_a / 2l) + kT \int_0^{C_0} \frac{\partial \Gamma_1}{\partial h} \frac{dC}{C_0} + k_{пар} T \int_0^{C_{пар}} \frac{\partial \Gamma_{инар}}{\partial h} \frac{dC}{C_0} + 2\Pi_m(h) \right]}{(10)}$$



Рис. 3 Аншліф вуглемалярної гранули: вугілля марки Г; масовий вміст реагента (мазута М100) – 12 %; крупність вугілля – 0-1 мм; збільшення  $\times 125$ ; 1-6 – вугільні зерна

При в'язких реагентах-зв'язуючих, коли їх незначна рухомість перешкоджає виникненню капілярного меніску,

$$F_a^{IV} = \beta_{ko} \cdot l \cdot r^2 \cdot k_\beta \quad \text{при } l_b > 2h_a \quad (11),$$

$$F^{IV} = \beta_{ko} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot k_\beta - F_p \quad \text{при } l_b \leq 2h_a \quad (12).$$

Наведені викладки є універсальними безвідносно до властивостей вугільних зерен і зв'язуючого матеріалу. Для конкретних умов застосовуваність одержаних рівнянь звужується. Так для агрегатів IV типу з вугілля крупністю 0,2 (0,3) – 1 (2) мм і мазуту М100 згідно наших мікроскопічних досліджень (рис. 3, 4) завжди справедливо  $l_b > 2h_a$ , тому для них треба користуватися тільки рівняннями (9) та (11). Для агрегатів I типу з вугілля 0-1 мм та мазуту навпаки, для близько 90 % контактів зерен справедливо  $l_b \leq 2h_a$ , тому для цих умов треба користуватися рівняннями (10) та (12).

Сила зчеплення вугільних зерен в агрегатах II типу  $F_a^{II}$  може бути визначена за формулою (1) при умові заміни складової  $F_k$  силою капілярного розрідження  $F_{кр}$ , обумовленою ввігнутими менісками зв'язуючого між вугільними зернами на поверхні агрегату. При об'ємній частці пустот в загальному об'ємі агрегату  $\epsilon_a = 0,25 \dots 0,40$  [1]:

$$F_{кр} = (0,65 \dots 1,10) F_k \quad (13).$$

Для одержаних нами з вугілля крупністю 0-1; 0-2; 0-3; 0-6 мм та мазуту гранул  $\epsilon_a = 0,30 \dots 0,38$ . Інтерполюючи дані [1] для цих гранул II типу отримуємо:

$$F_{кр} = (0,78 \dots 1,00) F_k \quad (14).$$

Таким чином, силу зчеплення  $F_a^{II}$  для випадків  $l_b > 2h_a$ ,  $l_b \leq 2h_a$  можна знайти, використовуючи рівняння (9), (11), (12) та (14). При цьому випадок  $l_b \leq 2h_a$  для вуглемалярних агрегатів II типу має виключно фрагментарний характер. Він зовсім нетиповий для вуглемалярних гранул, про що свідчать наші дослідження їх аншліфів.

Відзначимо, що зі збільшенням анізодіаметричності форми частинок відстань  $2h_a$  імовірно зменшується так як на гранях і

ребрах зерен граничні шари зв'язуючого мають меншу товщину. Тому форма вугільних зерен суттєво впливає на характер структуроутворюючих сил в агрегаті.

Для агрегатів III типу агрегатоутворюючою є тільки сила поверхневого натягу, яку для краплі можна визначити по закону Тейта, або уточнюючому його рівнянню Гаркінса-Брауна [13]:

$$\sigma_n = \frac{P_{кр}}{2\pi \cdot r_k \cdot f} \quad (15),$$

де  $P_{кр}$  – фактична вага краплі;

$r_k \cong r_{кр}$  – радіуси капіляру і краплі;

$f$  – поправочний коефіцієнт.

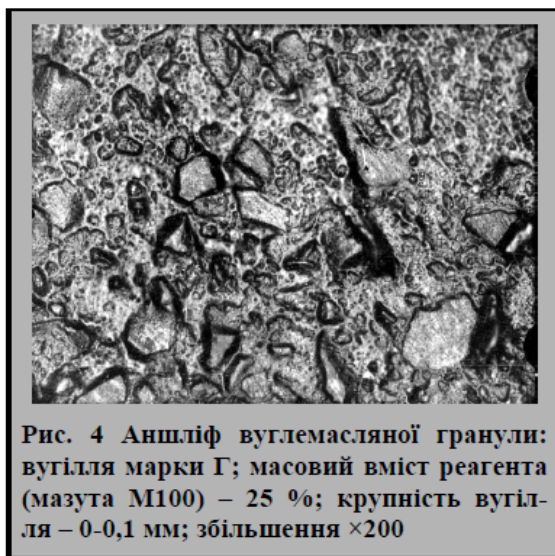


Рис. 4 Аншліф вуглемасляної гранули: вугілля марки Г; масовий вміст реагента (мазута М100) – 25 %; крупність вугілля – 0-0,1 мм; збільшення  $\times 200$

#### Висновки

1. Мікроскопічними дослідженнями показано, що вугле-реагентні структури, які утворюються при селективній масляній агрегації вугільних шламів, можна розділити на чотири типи, для кожного з яких домінують певні сили зчеплення – капілярні, когезійні, аутогезійні, розклинюючого тиску тонких шарів зв'язуючого.

2. Запропоновано математичний апарат для визначення основних структуроутворюючих сил вугле-реагентних агрегатів. Одержані залежності можуть бути використані для визначення міцності вугле-масляних гранул, агрегатів та флокул і оцінки їх технологічних властивостей як об'єктів збагачення і зневоднення вугільних шламів.

У подальших дослідженнях планується теоретично обґрунтувати раціональні межі витрат масляних реагентів для вуглемасляних структур різного типу, одержуваних з вугільних шламів.

#### Бібліографічний список

1. Білецький В.С. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля / В.С. Білецький, П.В. Сергєєв, Ю.Л. Панушин. – Донецьк: Грань, 1996 – 264 с.
2. Сергєєв П.В. Селективна флокуляція вугільних шламов органічними реагентами / П.В. Сергєєв, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 240 с.
3. Shrauti S.M. Recovery of waste fine coal by oil agglomeration / S.M. Shrauti, D.W. Arnold // Fuel. – 1995. – V. 74/ – № 13. – P. 454-465.
4. Харада Т. Агломерація у рідинах / Т. Харада, Т. Мацуо // Ніхон Когьо Кайсі. – 1982. – № 1134. – С. 714-722.
5. Ed Mishra Surendra K. Fine coal processing / Ed Mishra Surendra K., Klimpel Richard R. – Park Ridge, N.J.: – Noyes Publ., 1989. – 450 p.
6. Чермонов В.М. Исследование и разработка комплексной технологии обогащения и глубокого обезвоживания угольных шламов с добавкой вязких органических продуктов: автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук. – М.: 1973. – 25 с.
7. Чермонов Б.М. Обогащение угольной мелочи методом масляной флотации / Б.М. Чермонов, М.В. Циперевич //

- Подготовка и коксование углей.* – Свердловск, 1967. – Вып. 7. – С. 234-261.
8. А.с. 289117 СССР. МКИ C10B 57/12. *Способ переработки угольной шихты* / В.М. Чермонов, М.В. Циперович, В.П. Курбатов; ВУХИН. – 1182688/25-26; заявл. 25.08.67; опубл. 08.12.70. – Бюл. № 1. – С. 4.
9. Елишевич А.Т. *Обогащение угольных шламов методом масляной агломерации* / А.Т. Елишевич, Ю.Л. Папушин, В.С. Белецкий // *Кокс и химия.* – 1991. – № 5. – С. 7-9.
10. Духин С.С. *Коагуляция и динамика тонких пленок* / С.С. Духин, Н.Н. Рулев, Д.С. Димитров. – К.: Наукова думка, 1986. – 226 с.
11. Дерягин Б.Н. *Адсорбция и расклинающее давление тонких прослоек бинарных растворов* / Б.Н. Дерягин, Н.В. Чураев // *Коллоидный журнал.* – 1975. – Т. 37. – Вып. 6. – С. 1075-1081.
12. Зимон А.Д. *Адгезия пыли и порошков* / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1976. – 430 с.
13. Адамсон А.В. *Физическая химия поверхностей* / А.В. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568 с.

Рукопись поступила в редакцию 19.05.2011