

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ КОНТАКТУ АГРЕГАТОУТВОРЮЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ МАСЛЯНІЙ АГРЕГАЦІЇ ТОНКОДИСПЕРСНОГО ВУГІЛЛЯ

В. Білецький^{1*}, П. Молчанов², В. Орловський², Л. Шпильовий³

¹Кафедра видобування нафти, газу та конденсату, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

²Кафедра обладнання нафтових і газових промислів, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Полтава, Україна

³ТОВ "Азов-Мінералтехніка", Дмитрівка, Україна

*Відповідальний автор: e-mail biletsk@i.ua, тел. +3800951245231

RESEARCH INTO THE MECHANISM OF AGGREGATE-FORMING OBJECTS CONTACT WITH OIL AGGREGATION OF FINELY-DISPERSED COAL

V. Biletskyi^{1*}, P. Molchanov², V. Orlovskyi², L. Shpylovyi³

¹Department of Oil, Gas and Condensate Extraction, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

²Department of Equipment of Oil and Gas Fields, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

³LLC "Azov-Mineraltekhnik", Dmytrivka, Ukraine

*Corresponding author: e-mail biletsk@i.ua, tel. +3800951245231

ABSTRACT

Purpose. To investigate separate phases inherent to the process of "reagent – coal grain" contact during oil aggregation of coal, in particular, to analyze the following phases of the contact process: "encounter of aggregate-forming objects", "convergence", "water film rupture", "reagent spreading". To identify the main technological factors that determine the result of these phases of coal-oil aggregation process, and the factors of the process intensification.

Methods. Laboratory experimental studies of coal oil aggregation process, microscopy, pH-measurement.

Findings. The main technological factors that determine the result of separate phases of coal oil aggregation process are established. For "encounter" phase – the coarse grain size of the coal and the reagent drops, the Re number, the density of coal and liquid; kinematic viscosity; energy dissipation per unit of time; for "convergence" phase – pH, surfactants, water medium temperature, temperature difference between the medium and aggregate-forming objects; the shape of grains; for "water film rupture" phase – the same factors as are relevant for the "convergence" phase, plus relative velocity of objects, their mass, water viscosity; for "spreading" phase – viscosity of the ductile oil, chemical "reagent – coal" interactions, gradient of oil surface tension, oil drop volume, kinetic energy of aggregate formation objects.

Originality. The mechanism of contact between aggregate-forming objects (carbon grains and reagent) is determined for individual phases of the contact sub-process: objects encounter – objects convergence – water film rupture – reagent spreading.

Practical implications. The analysis allows to conduct a targeted search for ways of intensifying selective aggregation of coal. Technological factors that increase the efficiency of aggregation formation in the case of oil aggregation (agglomeration, granulation) of finely dispersed coal are singled out.

Keywords: oil aggregation of coal, phenomenological model of the process, mechanism of aggregate-forming objects contact, factors of the process intensification

1. ВСТУП

1.1. Постановка проблеми

Сучасні висококомеханізовані способи видобутку вугілля обумовлюють вміст у рядовому вугіллі дрібнодисперсних фракцій крупністю 0 – 1 мм від 3.2 до

40%, а з урахуванням шламуутворення при транспортуванні та збагаченні – до 50 – 60% (Filipenko, Morozova, & Fedoseeva, 2013). Переробка цієї сировини являє велику проблему, особливо тонкодисперсних фракцій 0 – 0.15 (0.2) мм, ефективність збагачення яких гравітаційними методами (відсадка, важ-

косередовищні гідроциклони, гідросайзери) суттєво знижена. Єдиним широко застосовуваним методом первинної переробки (збагачення) тонкодисперсних фракцій вугілля залишається флотація (Novak & Kozlov, 2012). Однак, ефективність вилучення в концентрат вугільних зерен крупністю -0.05 мм при використанні класичної флотації залишається невисокою. Більш ефективною для тонких класів є колонна флотація, “турбулентна мікрофлотація” або ТМФ-технологія. Розроблено також спосіб “флотації з носієм” тощо (Smurnov & Biletskyi, 2010). Таким чином, основною проблемою, яка потребує подальшого дослідження є збагачення вугілля фракції -0.05 мм.

Найбільш ефективним шляхом вирішення проблеми збагачення тонкодисперсного і особливо ультратонкого вугілля є його попередня селективна агрегація (флокуляція, агломерація, грануляція) у водному середовищі гідрофобним реагентом з подальшим вилученням і переробкою продукту (Biletskyi, Serhieiev, & Papushyn, 1996; Trass, Vasquez, Campbell, Gandolfi, & Koka, 1994; Serhieiev, 2008). Промислова апробація показала високу ефективність збагачення вугілля крупністю $0 - 0.15$ (0.2) мм, в тому числі ультратонкого класу $0 - 0.05$ мм, селективною масляною флокуляцією (процес “ОВЗУМС”), масляною агломерацією і грануляцією (Biletskyi, Serhieiev, & Papushyn, 1996; Trass, Vasquez, Campbell, Gandolfi, & Koka, 1994), селективною латексною флокуляцією (Serhieiev, 2008). При цьому, слід підкреслити, що область практичного застосування селективної агрегації тонкого вугілля включає як шлам збагачувальної фабрики (водно-шламова система), так і лежаний вуглевісний матеріал відходів збагачення у мулонакопичувачах (Zlobina, Papin, & Ignatova, 2016).

Зважаючи на перспективність масляної агрегації як спеціального методу переробки тонкодисперсного вугілля, актуальним завданням щодо подальшого удосконалення і розвитку технології масляної агрегації є дослідження механізму процесу агрегатоутворення, виділення основних фізичних та хімічних факторів, які обумовлюють вилучення з вихідної пульпи в агломераційний концентрат ультратонкого вугілля класу -0.05 мм.

1.2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Встановлено, що на результати процесу масляної агломерації тонкодисперсного вугілля впливають тип масла, розмір часток вугілля і величина рН водного середовища (Rafaqat, Akhtar, Sheikh, & Munir, 2015). У досліджах як зв'язуюче використано касторове і рапсове масло, які, відповідно, забезпечили 75 і 64% вихід агломератів. Теплотворність вуглемасляних агломератів склала 6.257 ккал/кг у порівнянні з 4903 ккал/кг для вихідного вугілля. При цьому вміст золи у вугільному паливі знизився на 66%. Ці показники дозволили авторам оцінити процес масляної агломерації тонкодисперсного вугілля як ефективний. Разом з тим, попри виділення впливаючих на результати агломерації варіативних вхідних факторів, його механізм не розкрито.

При масляній агломерації тонкодисперсного китайського вугілля як зв'язуюче використана рослинна олія (Wang et al., 2010). Крупність вихідного вугілля:

$0 - 75$; $75 - 150$; $150 - 212$; $212 - 300$ мкм. Витрати масла-зв'язуючого до вугілля – 25 мас.%. Відношення “вугілля : вода” в пульпі 15:200. Варіативні параметри: тривалість агітації та швидкість імпелера мішалки. Досліджено вплив на результати процесу крупності вихідного матеріалу, швидкості обертання імпелера мішалки, тривалості агітації. Найвищий індекс ефективності процесу отримано для вихідного вугілля $0 - 75$ мм. Режим перемішування у всіх досліджах турбулентний, але зафіксовано зниження індексу ефективності процесу при обертах імпелера 2000 хв⁻¹, при 1000 і 2500 хв⁻¹ цей індекс порівняно вищий. Вплив тривалості агітації на результати процесу вивчався в інтервалі $5 - 25$ хв, а важливий період $0 - 5$ хв залишився не дослідженим. Найбільший індекс ефективності процесу має місце при 15 хв і надалі мало змінюється. Відмінною і позитивною особливістю дослідження (Wang et al., 2010) є ІЧ-спектроскопія зв'язуючого – рослинної олії, що дозволило виявити функціональні групи, які дають можливість характеризувати структуру реагенту. Одержаний емпіричний матеріал є вельми цінним, зокрема, раціональні межі швидкості імпелера та тривалості агітації – для вибору раціональних режимних параметрів процесу, крупність вихідного вугілля і виявлення функціональних груп у реагенті-зв'язуючому – для пояснення структуруючих сил зчеплення в агрегат вугільних зерен та взаємодії “вугілля – реагент”. Але при цьому дослідження носить констатбельний характер, не пояснюючи механізм агрегатоутворення.

Методом дисперсійного аналізу встановлено такий ряд значимості впливу вхідних параметрів процесу на вихід: розмір частинок вугілля (55.35%) – тип вугілля (17.84%) – густина пульпи (16.50%) – тип масла (8.41%) (Chary & Dastidar, 2012). Отримана математична статистична модель процесу масляної агрегації вугілля. Експериментально досягнуто максимальне вилучення вугілля в концентрат на рівні 91.03% при наступних оптимальних умовах: розмір частинок $75 - 200$ мкм і густина пульпи 3%.

При збагаченні фуцзяньського вугілля масляною агломерацією (Lin, Chen, Chen, Li, & Wu, 2012) встановлено, що основними факторами, які визначають результат процесу масляної агрегації, є: концентрація вугілля в пульпі, витрати масла-зв'язуючого, тип масла (застосовувалися: нафта; рапсове масло). Результати показали, що при концентрації вугілля в суспензії 11.1% і витратах масла 12.5% вміст золи може бути зменшено з 32 до 2.8%, зольність відходів сягає до 93%. Цим підтверджено високу ефективність процесів агрегації і вилучення вугілля різними гідрофобними реагентами з розрідженої гідросуміші (суспензія з концентрацією твердого 11%). Крім того, важливим для раціонального вибору режимних параметрів процесу є фіксація витрат масла-зв'язуючого (12.5%). Механізм процесу агрегатоутворення не розглядається.

Дослідження (Sahinoglu & Uslu, 2008) виявили такі фактори впливу на процес масляної агрегації кам'яного вугілля: тип масла, вміст вугілля у пульпі, вміст масла, тривалість агломерації, крупність вихід-

ного вугілля, агломерації, крупність вихідного вугілля, рН пульпи, швидкість перемішування. Зафіксовано не тільки знезолнення, але й знесірчення вихідного вугілля. Останнє має велику практичну цінність, так як вміст сірки у вугільному концентраті суттєво детермінує екологічну складову його подальшого використання як палива чи для приготування коксівної шихти. Позитивним є і зафіксований авторами широкий перелік технологічних факторів впливу на процес. Водночас механізм агрегатоутворення не розглядався.

Процес масляної агломерації рядом наукових шкіл досліджується для десульфурації і знезолнення лігніту – бурого вугілля (Singh, Bhargava, Singh, & Menaria, 2012). Встановлено, що результати процесу масляної агрегації малометаморфізованого вугілля визначають такі технологічні фактори впливу на процес масляної агломерації: концентрація твердого в пульпі, витрати масла-зв'язуючого, тривалість агломерації, вид масла. При цьому застосовувалися різні вуглеводневі масла – толуол, дизельне паливо і соснове масло. Теплотворна здатність зразка лігніту була збільшена до 2190 від 1687 ккал/кг. Одержані результати підтверджують можливість облагородження (знезолнення, агрегації, десульфурації) масляною агломерацією не тільки кам'яного, але і бурого вугілля, хоча механізм процесу, як і в попередніх оглянутих роботах, не досліджено.

У першій частині дослідження (Абакау Temel, Bozkurt, & Majumder, 2009) встановлено вплив на збагачення (знезолнення і десульфурація) бурого вугілля масляною агломерацією таких факторів: концентрація твердого в пульпі, витрати масла-зв'язуючого, вид масла, рН рідкої фази. Друга частина дослідів присвячена вивченню впливу на протікання і результати процесу водної фази: озерної води і морської води (вода Середземного моря, вода Егейського моря, і вода Чорного моря). Аналогічні результати одержані при дослідженні впливу середземноморської води на десульфурацію вугілля масляною агломерацією при використанні як вихідної сировини суббітумінозного (довгополуменевого) кам'яного вугілля Зонгулдака (Temel, 2010). У третій частині роботи досліджено вплив різних солей (NaCl, MgCl₂ і FeCl₃) на агломерацію лігніту. Результати агломерації показали, що використання кальцинованої озерної води і морських вод позитивно впливає на зниження загального вмісту сірки в агломератах. Крім того, використання NaCl, MgCl₂ і FeCl₃ в агломераційному середовищі позитивно впливає на зниження вмісту золи агломератів. Безперечною практичною цінністю цієї роботи є підтвердження можливості успішного ведення процесу масляної агломерації вугілля не тільки в прісній воді, але і в засолений, зокрема, морській, хоча хімізм процесів, параметричні обмеження засоленості водної фази не простежено.

1.3. Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Таким чином, багатий експериментальний матеріал досить повно висвітлює технологічні фактори впливу на процес масляної агрегації вугілля але дослідження механізму процесу агрегатоутворення практично відсутнє. Зокрема, відсутні дослідження пер-

ших фаз агрегатоутворення – контакту агрегатоутворюючих об'єктів при масляній агрегації. Також недостатньо визначено вплив основних фізичних та хімічних факторів, які обумовлюють вилучення з вихідної пульпи в агломераційний концентрат вугільної фази, особливо, ультратонкого вугілля класу 0 – 0.05 мм.

2. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виходячи з вирішальної ролі, яку відіграє контакт агрегатоутворюючих об'єктів, – вугільних зерен та реагенту, – на результати процесу масляної агрегації вугілля, автори ставлять на меті дослідити окремі фази процесу контакту “реагент – вугільне зерно” при масляній агрегації вугілля.

Для досягнення цієї мети ставиться задача аналізу таких фаз процесу контакту “реагент – вугільне зерно”: фаза “зустріч агрегатоутворюючих об'єктів”, фаза “зближення”, фаза “прорив водної плівки”, фаза “розтікання реагенту”, і встановлення основних технологічних факторів, які визначають результат зазначених фаз. Виконання цих задач базується на використанні відомого та авторського емпіричного матеріалу.

3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Матеріали та обладнання

Досліджувалося донецьке вугілля марки Г, 0 – 100 мкм; 0 – 1 мм; 0 – 2 мм. Як реагент-зв'язуюче застосовували мазут марки М100.

При підготовці і збагаченні вугілля використовувалося таке обладнання. Лабораторний подрібнювач, ситовий вібраційний аналізатор, лабораторна установка для реалізації процесу масляної агрегації вугілля, що включала турбінну мішалку з електроприводом і зміною частоти обертання вала у межах 0 – 70 с⁻¹. Для підігрівання реагенту призначений чашковий електропідігрівач. Для дозування реагенту застосовувався мірний шприц. Для приготування водовугільних пульп заданого складу (густини) – мірний посуд і лабораторні ваги.

3.2. Методика досліджень

Для вимірювання рН застосовувався рН-метр МАРК-902МП, температури реагенту t_m і пульпи t_c – ртутний термометр, тривалості пелетування t_a – секундомір, вимірювання частоти обертання n_s вала мішалки – тахометр. Для візуальної фіксації ефекту флокуляції тонкодисперсного вугілля застосовувався мікроскоп МБС-9в.

4. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Продуктивним системним методом вивчення масляної агрегації вугілля є аналіз цього процесу як сукупності послідовно і паралельно протікаючих елементарних актів (суб-процесів) (Biletskyi, Serhiciev, & Rapushyn, 1996). На Рисунку 1 показана узагальнена феноменологічна модель процесу масляної агрегації вугілля, де суб-процес контакту агрегатоутворюючих об'єктів, – вугільних зерен та реагенту, є першим і відіграє вирішальну роль, детермінуючи результати наступних субпроцесів і селективної масляної агрегації вугілля в цілому.

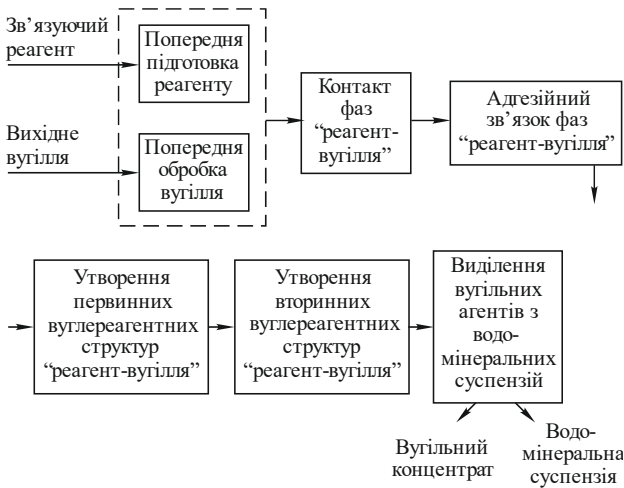


Рисунок 1. Узагальнена феноменологічна модель процесу масляної агрегації вугілля

У загальному випадку суб-процеси “підготовка зв’язуючого” і “попередня обробка вугілля” включають модифікацію вугільної поверхні хімічними добавками, нагрівання та емульгування реагенту у воді, приготування водовугільних композицій. Попередня обробка вугілля здійснюється з метою розкриття мінеральних включень та підвищення поверхневої активності вугілля. Частіше всього вона полягає у подрібненні вугілля до необхідної крупності, іноді – у присутності реагентів-модифікаторів поверхні. При низькій агрегаційній здатності вугілля здійснюють відновлювальну гідрофобізацію вугільної поверхні шляхом перемішування його в гідросуміші з поверхнево-активними речовинами, легкими маслами тощо (Biletskyi, Serhieiev, & Papushyn, 1996; Serhieiev, 2008).

В наших досліджах ми застосовували нагрівання високов’язкого зв’язуючого реагента – мазуту М100 до температури 100°C. Вихідне вугілля подрібнювали до

крупності 0 – 100 мкм; 0 – 1 мм; 0 – 2 мм, що забезпечувало розкриття вугільної та породної компонент.

Для з’ясування механізму контакту агрегатоутворюючих об’єктів – вугільних зерен та реагенту, виділимо такі фази суб-процесу контакту: зустріч об’єктів – зближення об’єктів – прорив водної плівки – розтікання реагенту.

4.1. Фази суб-процесу контакту агрегатоутворюючих об’єктів: зустріч об’єктів – зближення об’єктів

У фазах зустрічі і зближення об’єктів з нашої точки зору доцільно враховувати механічний аспект і гідродинамічну взаємодію об’єктів.

4.1.1. Механічний аспект

Передбачає броунівський, градієнтний, дифузійний та інерційний механізм зустрічі об’єктів дисперсної системи (Levich, 1959; Deryagin, Samygin, & Livshits, 1964; Deryagin, 1959). Число зустрічей N_z частинок за цими механізмами в одиницю часу визначається з виразів, зведених у Таблиці 1. Причому, виходячи з уявлень теорії Л.Д. Ландау та В.Г. Левіча про режим течії води в пристійному шарі, механізм турбулентної дифузії забезпечує зустріч частинок радіусів R та r ($R \gg r$). Градієнтний механізм має місце, в основному, в пристійному прошарку води робочої камери імпелерного гранулятора. Товщина цього прошарку δ_{np} за нашими розрахунками складає 30 – 200 мкм. Для нього $\Gamma_V = 500 - 3500 \text{ c}^{-1}$ при $V_n = 0.1 - 1 \text{ м/с}$ ($Re = 10^5 - 10^6$). При тих же параметрах V_n та Re зерна крупністю 10 мкм мають швидкість відносно рідини $3.3 \cdot 10^{-7} - 3.3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$, а зерна 0.5 мм – $2.2 \cdot 10^{-3} - 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$. Отже зерна $r \cong 10 \text{ мкм}$ практично повністю захоплюються робочою рідиною, тоді як крупні зерна рухаються за рахунок інерції перетинаючи елементарні лінії течії.

Таблиця 1. Питоме число зустрічей агрегатоутворюючих об’єктів (в одиниці об’єму суспензії за одиницю часу)

Механізм зустрічей	Формула	Умови та межі чинності формули
Броунівський	$N_{з.б.} = 8\pi \cdot D_\delta \cdot R \cdot r \cdot n_0^2$	(1) 10^{-2} мкм; до 1% вугільної маси; частинки сажі (10 нм). Дія – по всьому об’єму суспензії.
Градієнтний	$N_{з.г.} = 10.7 \cdot n_0^2 \cdot \Gamma_V \cdot r$	(2) В ламінарному потоці або турбулентному вздовж твердої поверхні (стінки).
Турбулентна дифузія	$N_{з.т.д.} = \frac{1}{l_M^2} r^3 \cdot \nu \cdot n_0^2 \cdot Re^{\frac{3}{2}}$	(3) В турбулентному потоці $r \leq 0.1$ мкм – 10 мкм
Інерційний	$N_{з.і.} = \frac{\rho_\epsilon}{\rho_0} n_0^2 \cdot \frac{\epsilon^{\frac{3}{4}}}{\nu} \cdot r^4$	(4) В турбулентному потоці $r > 1 - 10$ мкм (99% вугільної маси)

Примітки: D_δ – коефіцієнт броунівської дифузії; R, r – діаметри об’єктів; n_0 – число частинок в одиниці об’єму; Γ_V – градієнт швидкості частинок в рідині; l_M – максимальний масштаб пульсацій турбулентності; ν – кінематична в’язкість; ϵ – параметр, що характеризує дисипацію енергії E за одиницю часу, $\epsilon = dE / dt$

Проаналізуємо відносну агрегаційну дію градієнтного та інерційного механізмів зустрічі об’єктів. Виходячи з рівнянь (2) та (4) маємо:

$$\frac{N_{з.г.}}{N_{з.і.}} = \frac{10.7 \cdot n_0^2 \cdot \Gamma_V \cdot r}{\left(\frac{\rho_\epsilon}{\rho_0}\right) \cdot n_0^2 \cdot \left(\frac{\epsilon^{3/4}}{\nu}\right) \cdot r^4} \quad (5)$$

Враховуючи, що $\Gamma_V \sim V_{m,n} / \delta_{np} \sim V_{m,n} / \nu$ (Levich, 1959), де $V_{m,n}$ – швидкість турбулентних пульсацій, та приймаючи $10.7 / (\rho_\epsilon / \rho_0) = K_1$ маємо:

$$\frac{N_{з.г.}}{N_{з.і.}} \cong \frac{K_1 \cdot V_{m,n}}{\epsilon^{3/4} \cdot \nu^3} \quad (6)$$

Отже, чим більше швидкість турбулентних пульсацій, тим більше частка “градієнтних” зустрічей, а

чим більше діаметр зерен і крапель зв'язуючого – тим більше частка “інерційних”. Спробуємо кількісно оцінити $N_{3,z}/N_{3,i}$. При густині рідини $\rho_0 = 1.0$; щільність вугілля $\rho_6 = 1.4 \text{ г/см}^3$; $K_1 = 1.4$. Прийmemo $V_{m,n} = 1 \text{ м/с}$; $r = 0.1 \text{ мм}$. За даними (Levich, 1959) $\varepsilon \cong 10^3$; $\varepsilon^{3/4} \cong 130$. Тоді для $N_{3,z}/N_{3,i} \cong 10.8 \cdot 10^3$ за умови однакового об'єму, в якому діє градієнтний та інерційний механізм, тобто $V_z = V_i$. В дійсності ж $V_z \ll V_i$. Якщо робоча камера гранулятора – циліндр $R_{\text{ц}} = 50 \text{ мм}$, $H_{\text{ц}} = 200 \text{ мм}$, а $\delta_{\text{np}} = 0.1 \text{ мм}$, то $V_i/V_z = 250$. Тоді з урахуванням об'ємної поправки маємо $N_{3,z}/N_{3,i} = 11.7 \cdot 10^4 : 250 = 468$. Отже, за розрахунками маємо значне переважання градієнтного механізму зустрічі над інерційним. Але тільки для зерен $d \ll \delta_{\text{np}}$. Останнє застереження є умовою реалізації власне градієнтного механізму зустрічі об'єктів в потоці. Як показують наші стробоскопічні спостереження, в імпульсній мішалці біля стінок концентруються крупні зерна, а дрібні – біля імпульсера. Це значно зменшує можливість реалізації градієнтного механізму зустрічі в цих машинах. інша картина спостерігається в лінійних вуглепроводах, де розподіл зерен по перерізу потоку більш однорідний. Тут градієнтний механізм зустрічі імовірніший. В цілому слід констатувати що, для масляної агрегації тонкодисперсного вугілля ($\cong 0.1 \text{ мм}$) та дрібнодисперсного ($0 - 0.5 \text{ мм}$) вугілля найбільшу вагу мають градієнтний та інерційний механізми зустрічі. Для ультратонкого вугілля ($\leq 0.1 - 10 \text{ мкм}$) – режим турбулентної дифузії. Виходячи з того, що розвинена турбулентність представлена турбулентними потоками різного масштабу, швидкості та інтенсивності можна припустити наявність змішаного механізму зустрічі “турбулентна дифузія – інерційний”. Емпіричні дані, зокрема (Biletskyi, Serhieiev, & Papushyn, 1996; Serhieiev, 2008) дозволяють припустити високу ефективність такого змішаного механізму зустрічі для зерен крупністю $10 - 50 \text{ мкм}$.

4.1.2. Гідродинамічна взаємодія об'єктів

Розрізняють близьку і далеку гідродинамічну взаємодію (БГВ та ДГВ) об'єктів при їх русі у рідині.

Близька гідродинамічна взаємодія (БГВ) визначається властивостями тонких поверхневих шарів води (Deryagin, Churaev, & Ovcharenko, 1990). Відомо, що вони можуть бути двох принципово різних типів – зі зменшеною та збільшеною тангенсійною рухливістю молекул води. Перші мають місце на гідрофільних поверхнях, другі – на гідрофобних. Для поверхні агрегатоутворюючих компонент (вугілля та зв'язуючого) характерний великий діапазон проміжних етапів та гідрофільно-гідрофобна мозаїчність.

У першому випадку диполі води орієнтуються перпендикулярно поверхні речовини. Товщина цього шару може сягати $1 - 100 \text{ мкм}$. 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 $65 - 70^\circ$ (до моношару молекул води). Згідно теорії нерозчинного об'єму Б. Дерягіна, збільшен-

ня концентрації розчинюваної речовини призводить до потоншення плівки води. За даними (Deryagin, Churaev, & Ovcharenko, 1990) руйнування особливої структури граничних шарів води починається при концентрації електроліту $> 10^{-2} \text{ моль/л}$. Стійкість товстих β -плівок (Рис. 2) визначається в основному дальнодіючими електростатичними силами, тобто фактором ПЕШ.

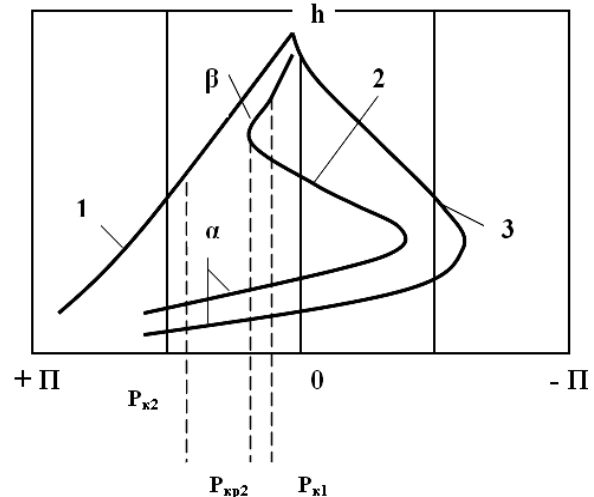


Рисунок 2. Ізотерми розклинюючого тиску змочуючих плівок (за Б.В. Дерягіним та ін.): h – товщина плівки; Π – розклинюючий тиск; 1 – товсті (~100 нм) стабільні плівки, добра змочуваність; 2 – товсті метастабільні β -плівки, які при пориві переходять у тонкі (~10 нм) термодинамічно стійкі α -плівки; 3 – тонкі α -плівки (~1 нм), погана змочуваність

Останнє особливо важливе для розуміння впливу рН-регулятора на процес масляної агрегації вугілля. 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 ($P_h < P_0$) (Deryagin, Churaev, & Ovcharenko, 1990).

Таким чином, БГВ агрегатоутворюючих об'єктів у процесі селективної масляної агломерації залежить від гідрофобно-гідрофільних властивостей поверхонь об'єктів, рН водного середовища, його температури t_c , твердості води. Виходячи з таких уявлень легко пояснюється виявлений в наших дослідях вплив рН-регуляторів на флокуляцію вугілля (Рис. 3), ефект $\tau_a' \rightarrow \min$ при $t_c \geq 80^\circ\text{C}$ (Рис. 4), а також виявлений в роботах (Abakay Temel, Bozkurt, & Majumder, 2009; Temel, 2010) позитивний вплив на агломерацію морської та засоленої води.

При $P_h > P_0$ БГВ перешкоджають, а при $P_h < P_0$ сприяють контакту агрегатоутворюючих часточок. Кількісною оцінкою БГВ є розклинюючий тиск $\Pi(h) = P_h - P_0$ (Deryagin, Churaev, & Ovcharenko, 1990). В першому наближенні, вважаючи вклад сил різної природи в розклинюючий тиск адитивним, для $\Pi(h)$ в загальному випадку маємо:

$$\Pi(h) = \Pi_e(h) + \Pi_m(h) + \Pi_s(h) + \Pi_a(h) + \Pi_c(h), \quad (7)$$

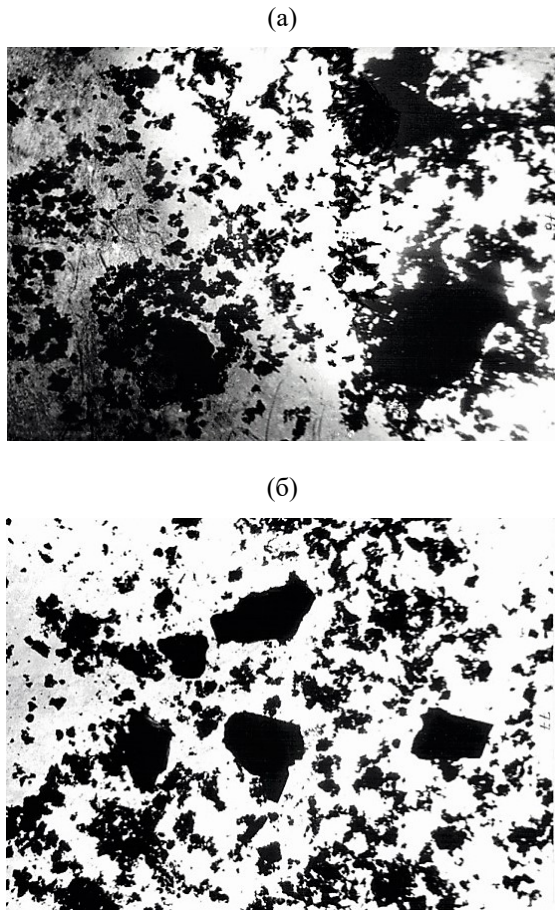


Рисунок 3. Фрагменти осаду антрацитно-породної суспензії: (а) $pH = 10.5$ – активна флокуляція; (б) $pH = 3$ – відсутність флокуляції (Biletskyi, Serhieiev, & Papushyn, 1996)

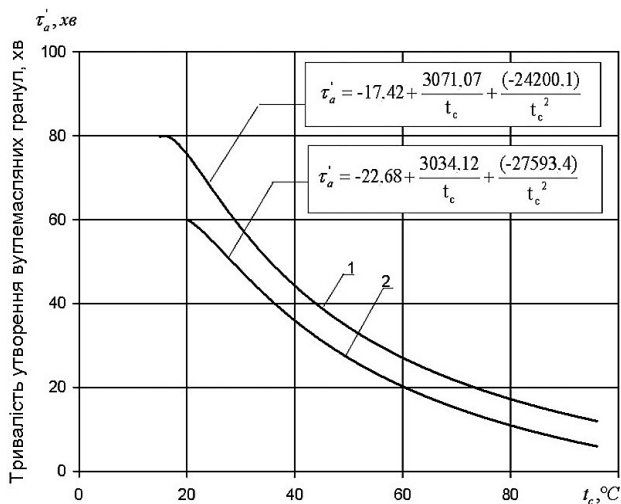


Рисунок 4. Експериментальні залежності тривалості τ_a утворення вуглемасляних гранул діаметром $d_a = 2.5 - 3.0$ мм від температури середовища t_c : 1 – чотирилопатевий імпелер; 2 – імпелер типу “біляче колесо” (вихідне вугілля – марки Г, $\theta = 0.1$ мм; витрати масла-зв’язуючого – мазута М100 $Q_m = 25$ мас.%; $pH = 11$, pH -регулятор NaOH; швидкість обертання імпелера $n_6 = 25$ c^{-1})

де:

P_e – йонна-електростатична складова, пов’язана з перекриттям дифузних йонних шарів;

P_m – молекулярна складова, обумовлена силами дисперсійної взаємодії міжфазних зон, в яких тензор флуктуаційного електромагнітного поля анізотропний;

P_s – структурна складова, викликана перекриттям граничних шарів рідини зі змінною структурою;

P_a – адсорбційна складова, пов’язана з перекриттям дифузних адсорбційних шарів нейтральних молекул в нейонних розчинах;

P_c – складова, обумовлена “стеричною” взаємодією адсорбційних шарів ПАР або полімерів.

Дальність дії БГВ визначається, очевидно, найбільш дальнодіючою складовою $P_e(h)$ 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 масляної агрегації вугілля. До таких факторів, крім перерахованих вище, належить, очевидно, 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 спостережувана нами на якісному рівні тенденція до прискорення агрегації при збільшенні Δt_c . Кількісна оцінка цього ефекту потребує додаткових досліджень.

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 (Deryagin, 1986).

Далека гідродинамічна взаємодія (ДГВ) виявляється 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. 5), утруднюючи їх контакт з крупним об’єктом.

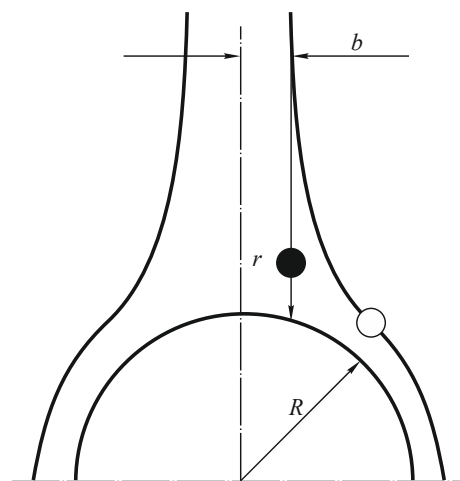


Рисунок 5. До механізму зустрічі агрегатоутворюючих об’єктів у водному середовищі: зміна траєкторії малих частинок під дією далекої гідродинамічної взаємодії (ДГВ): r, R – радіуси малої і великої частинки; b – відстань елементарної цівочки рідини, що обтікає зерно радіуса R

Нас цікавлять два питання:

- 1) крупність зерен, що “ухиляються” від зустрічі (і таким чином – від агрегації);
- 2) способи нейтралізації негативного впливу ДГВ на агрегацію дрібних частинок.

Розглянемо їх послідовно.

Для ефективності зіткнень (Dukhin, Rulev, & Dimitrov, 1986) маємо:

$$E_3 = \lambda^2 (\lambda + 0.5)^{-2}, \quad (8)$$

де:

λ – критерій Стокса, $\lambda = l_i/R$,

де:

l_i – відстань, яку мала частинка радіуса r спроможна подолати за рахунок початкової швидкості V_n :

$$l_i = 2V_n \cdot r^2 (\rho_b - \rho_0) / 9\nu.$$

З іншого боку для E_3 маємо (Levich, 1959):

$$E_3 \approx 3 \frac{r}{R}, \quad (r \ll R). \quad (9)$$

Використовуючи рівняння (8) та (9) для критичного радіуса $r_{кр}$, при перевищенні якого має місце механізм інерційного зіткнення частинки і об'єкту, одержуємо:

$$r_{кр} = \frac{1}{3} \lambda_{кр}^2 (\lambda_{кр} + 0.5)^{-2} \cdot R. \quad (10)$$

Враховуючи, що $\lambda_{кр} = 1/24$ (Levin, 1961) для $R = 3$; 1 мм, маємо $r_{кр} = 6$; 2 мкм. Вугільні зерна $r < 6$ мкм у фугаті центрифуги НОГШ-325 ($F_r = 2000$, аналог супер-декантер центрифуги фірми PENVOLT) за нашими даними наших досліджень складають $\sim 50\%$. Для таких тонких матеріалів, як сажі, $r \leq 1$ мкм. Все це свідчить про можливий серйозний вплив ДГВ на результати масляної агрегації тонких матеріалів, що обумовлює актуальність нейтралізації ДГВ. Розглянемо це питання.

Для турбулентного режиму течії одержано (Levich, 1959):

$$E_{з.турб} = \frac{4\pi R^2 \cdot j_{турб}}{\pi R^2 \cdot u(r) \cdot n_0}, \quad (11)$$

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 (11), В. Левіч показав, що при $r = 1 - 10$ мкм $E_{з.турб} \approx 1$. Це свідчить про велику роль турбулентної дифузії, яка практично згладжує негативний вплив ДГВ.

Розглядаючи рівняння (11), зупинимось на параметрі $j_{турб}$. В результаті тангенсiальної рухливості поверхні краплі зв'язуючого, тобто різних граничних умов для поверхні зерна $V_{зер}^n = 0$ (швидкість руху води) і зв'язуючого $V_{зв}^n \neq 0$, $j_{турб}^{зв} \gg j_{турб}^{зер}$. Звідси

$$E_{з.турб}^{зв} \gg E_{з.турб}^{зер}. \text{ Підвищена ефективність зіткнень}$$

$E_{з.турб}^{зв}$ може, на наш погляд, пояснювати різкий сплеск агрегаційної активності на початку перемішування водо-масло-вугільної суспензії. Але слід зазначити, що при зменшенні розміру крапель зв'язуючого, а також при збільшенні концентрації ПАР $V_{зв}^n \rightarrow 0$, що, очевидно, обумовлює існування оптимальних розмірів часточок емульсії масляного зв'язуючого та концентрації ПАР (з точки зору ефективності в процесі СА).

Таким чином, збільшення числа Re до 2000 – 3000 (розвинена турбулентність) є засобом нейтралізації негативного впливу 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, і в першу чергу це стосується системи “крапля зв'язуючого R – зерно r ” (Levich, 1959). Такий висновок експериментально підтверджується кривою $\tau_a(n_e)$, яка свідчить про активізацію агрегатоутворення з ростом $n_e \sim Re$ (Рис. 6).

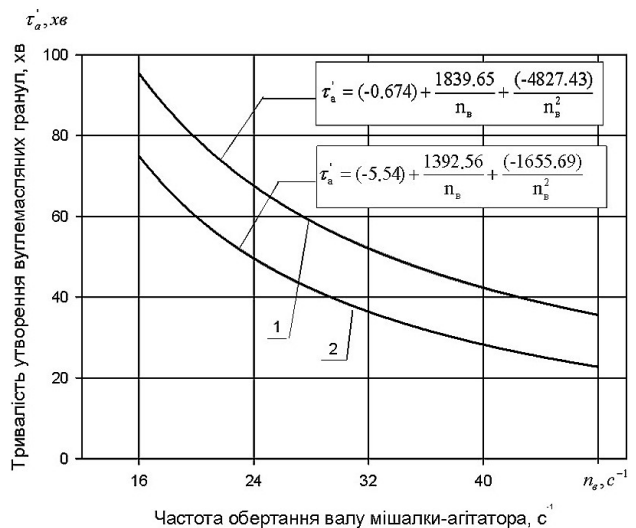


Рисунок 6. Експериментальні залежності тривалості τ_a' утворення вуглемасляних гранул від частоти обертання імелера мішалки-гранулятора $\tau_a'(n_e)$ (умови одержання див. на Рис. 4)

4.2. Фази суб-процесу контакту агрегатоутворюючих об'єктів: прорив водної плівки – розтікання реагенту

Розглянемо тепер заключні фази контакту агрегатоутворюючих об'єктів – вугільних зерен та реагенту: прорив водної плівки – розтікання реагенту.

При відстанях між об'єктами $H_{oo} = H_{БГВ}$ на поверхні краплі зв'язуючого радіусом більше 0.1 мм виникає деформаційна хвиля – так званий димпл, який для випадку зустрічі “вугільне зерно – крапля реагенту” має вигляд, зображений на Рисунку 7 (Biletskyi, Serhieiev, & Parushyn, 1996). Амплітуда флуктуацій димплу збільшується при негативному розклинючому тиску. Гідрофільно-гідрофобна мозаїчність вугільної поверхні зумовлює товщину і конфігурацію водної плівки на вугільному зерні. При переважно гідрофобній поверхні поверхнева гідратна плівка відсутня або нестійка.

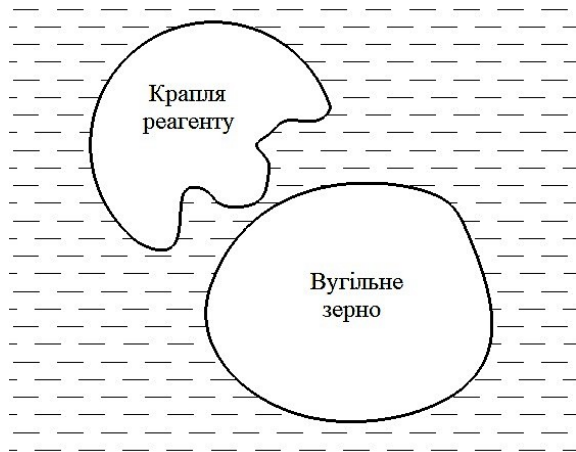


Рисунок 7. Деформаційна хвиля димпл для випадку зустрічі “вугільне зерно – крапля реагенту”

Фактори димплу, а також інерції об’єктів, турбулентної дифузії, різниці в швидкості потоків біля стінки робочої камери призводять до прориву цієї нестійкої поверхневої плівки води на вугільному зерні і утворення в місці прориву точкового або площинного контакту “вугілля – реагент”. При переважно гідрофільній поверхні вугільних зерен, як показано дослідями А. Шелудко та Х. Шульце, змочуюча плівка води при досягненні деякої критичної товщини (що коливається в межах 15 – 150 нм) втрачає стійкість та розривається. Отже, при зустрічі об’єктів “вугільне зерно – крапля реагенту” у водній пульпі виникає так звана “дірка” в гідратній плівці, що і веде до коалесценції об’єктів, злипання зерен вугілля з реагентом. Формула для швидкості розширення “дірки” вперше запропонована А. Дюпре (August Dupre) у 1864 році. Очевидно, в результаті в’язкого опору плівки води зі збільшенням радіусу “дірки” швидкість її розширення зменшується (Charles & Mason, 1960).

Після виникнення “дірки” настає остання фаза контакту – розтікання реагенту по вугільній поверхні. Найбільш повно і лаконічно цей процес можна характеризувати різницею між роботою адгезії та когезії, яка носить назву коефіцієнта розтікання за В. Гарнісом (Shebzukhova & Shebzukhov, 2010):

$$W_p = W_{ад} - W_{ко} = |\Delta E|, \quad (12)$$

де:

ΔE – зміна вільної поверхневої енергії системи, або фактором розтікання за М. Лотан (Lotan, Ailam, & Bitron, 1967):

$$\alpha_p = \frac{d_k}{d'} = \frac{r_k}{r'}, \quad (13)$$

де:

d', r' – діаметр, радіус краплі;
 d_k, r_k – діаметр, радіус зони контакту.

Розглянемо, які фактори впливають на цю стадію процесу. Крім крайового кута змочування, це, поперше, в’язкість самого реагенту, яка перешкоджає розтіканню (Dukhin, Rulev, & Dimitrov, 1986). По-друге, супутні хімічні взаємодії, які, очевидно, збільшують швидкість розтікання. По-третє, кінетична

енергія крапель, зокрема, тангенціальна складова сприяюча розтіканню (Zimon, 1974). По-четверте, градієнт поверхневого натягу (ефект Марангоні (Getling, 1998), який обумовлений, ліофільно-ліофобною мозаїчністю вугільної поверхні. По-п’яте, об’єм краплі V_k , сприяючий зростанню α_p (Lotan, Ailam, & Bitron, 1967) $r_k^3 = k_i \cdot V_k$; k_i – константа. Крім того, шорсткість зерен, очевидно, утруднює розтікання.

Зрозуміло, що механізми контакту “реагент – вугільне зерно” в “амальгамному” процесі масляної агрегації мають свою специфіку. Для виникнення “амальгами” особливу роль відіграє фактор кінетичної енергії $W_{кін}^3$, з якою зерна вугілля впроваджуються у плівку зв’язуючого. Умовою впровадження, очевидно, є:

$$W_{кін}^3 > \sigma_{зв-в} \cdot S_{конт}, \quad (14)$$

де:

$S_{конт}$ – площа периметру контакту;
 $\sigma_{зв-в}$ – поверхневий натяг на межі зв’язуюче – вода.
 Розкриваючи рівняння (14) маємо:

$$m_3 \cdot V_3^2 > 2\sigma_{зв-в} \cdot S_{конт}. \quad (15)$$

Після спрощень для критичної швидкості зерен одержуємо:

$$V_{з.кр} = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\sigma_{зв-в}}{\rho_в \cdot R_3} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Приймаючи $R_3 = 0.1 - 1.0$ мм, $\rho_в = 1400$ кг/см³, $\sigma_{зв-в} = 20 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² маємо $V_{з.кр} \cong (3 - 10) \cdot 10^{-2}$ м/с. Саме такі умови створюються у ядрі потоку турбінної мішалки при $Re = 10^5 - 10^6$. З рівняння (16) витікає, що для дрібних зерен умови впровадження у масло-вугільну “амальгаму” затруднені й потребують різкого зростання швидкості V_3 . Очевидно, входження тонких зерен в “амальгаму” йде по дифузійному механізму, а також в пристінній зоні за рахунок значного градієнту швидкостей Γ_V .

5. ВИСНОВКИ

Резюмуючи викладки статті, відзначимо, що вирішальними для фаз контакту “реагент – вугільне зерно” є такі фактори.

Фаза “зустріч”: крупність об’єктів зустрічі (зерен вугілля та крапель реагенту), число Re , місцезнаходження об’єктів (в ядрі потоку чи в пристінному шарі), параметри: $\rho_в, \rho_0$ – густина вугілля і рідини; ν – кінематична в’язкість; ε – параметр, що характеризує дисипацію енергії E за одиницю часу.

Фаза “зближення”: поверхневі властивості об’єктів, що визначають знак і величину розклинюючого тиску $\Pi(h)$, фактор рН, фактор ПАР, параметри: t_c – температура водного середовища; Δt_c – перепад температур між середовищем та агрегатоутворюючими об’єктами форма зерен.

Фаза “прорив водної плівки” – значущими є ті ж фактори, що й для фази “зближення” плюс відносна швидкість об’єктів, їх маса, в’язкість води.

Фаза “розтікання” – в’язкість масла-зв’язуючого, наявність супутніх хімічних взаємодій “реа-

гент – вугілля”, градієнт поверхневого натягу масла, об’єм краплі масла, кінетична енергія об’єктів агрегатоутворення.

Багатофакторність процесу контакту сильно ускладнює розрахунок його ефективності. В той же час, проведене дослідження дає можливість направлено пошуку шляхів інтенсифікації селективної агрегації вугілля.

ВДЯЧНІСТЬ

Дана стаття була б неможлива без результатів наступних науково-дослідних робіт:

1. “Розробити і впровадити нову технологію збагачення і зневоднення високозольних шламів методом “ОВЗУМС”” (ДР 01860028331).

2. “Розробка наукових основ і способів селективної агрегації вугілля та вуглевмісних продуктів” (ДР 01910043360).

Дані роботи виконувалися за рахунок видатків загального фонду державного бюджету.

REFERENCES

- Abakay Temel, H., Bozkurt, V., & Majumder, A.K. (2009). Selective Oil Agglomeration of Lignite. *Energy & Fuels*, 23(2), 779-784. <https://doi.org/10.1021/ef8005096>
- Biletskyi, V.S., Serhieiev, P.V., & Papushyn, Iu.L. (1996). *Teoriia i praktyka selektyvnoi maslianoi ahrehatsii vuhillia*. Donetsk: Hran.
- Charles, G., & Mason, S. (1960). The Coalescence of Liquid Drops with Flat Liquid/Liquid Interfaces. *Journal of Colloid Science*, 15(3), 236-267. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(60\)90026-x](https://doi.org/10.1016/0095-8522(60)90026-x)
- Chary, G.H.V.C., & Dastidar, M.G. (2012). Investigation of Optimum Conditions in Coal-Oil Agglomeration Using Taguchi Experimental Design. *Fuel*, 98, 259-264. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.027>
- Deryagin, B.V. (1959). Teoriya geteroakoagulyatsii, vzaimodeystviya i slipaniya raznorodnykh chastits v rastvorakh elektrolitov. *Kolloidnyy Zhurnal*, 16(6), 425-438.
- Deryagin, B.V., Samygin, V.D., & Livshits, A.K. (1964). Izuchenie flokulyatsii mineralov v turbulentsnom rezhime. *Kolloidnyy Zhurnal*, 26(2), 179-185.
- Deryagin, B.V. (1986). *Teoriya ustoychivosti kolloidov i tonkikh plenok*. Moskva: Nauka.
- Deryagin, B.V., Churaev, N.V., & Ovcharenko, F.D. (1990). *Voda v dispersnykh sistemakh*. Moskva: Khimiya.
- Dukhin, S.S., Rulev, N.N., & Dimitrov, D.S. (1986). *Koagulyatsiya i dinamika tonkikh plenok*. Kyiv: Naukova dumka.
- Filippenko, Yu.N., Morozova, L.A., & Fedoseeva, S.O. (2013). Analiz granulometricheskogo sostava dobyvaemykh ugley. *Ugol' Ukrainy*, (3), 12-14.
- Getling, A.V. (1998). *Rayleigh-Bénard Convection*. Advanced Series in Nonlinear Dynamics.
- Levich, V.G. (1959). *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika*. Moskva: Izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Дослідити окремі фази процесу контакту “реагент – вугільне зерно” при масляній агрегації вугілля, зокрема, аналіз таких фаз процесу контакту: фаза “зустріч агрегатоутворюючих об’єктів”, фаза “зближення”, фаза “прорив водної плівки”, фаза “розтікання реагенту”. Встановити основні технологічні фактори, що визначають результат зазначених фаз процесу масляної агрегації вугілля, фактори інтенсифікації процесу.

Методика. У роботі використано комплексний метод досліджень, що включає лабораторні експериментальні дослідження процесу масляної агрегації вугілля, мікроскопію, рН-метрію.

- Levin, L.I. (1961). *Issledovaniya po fizike grubodispersnykh aerorozley*. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR.
- Lin, S., Chen, B., Chen, W., Li, W., & Wu, S. (2012). Study on Clean Coal Technology with Oil Agglomeration in Fujian Province. *Procedia Engineering*, (45), 986-992. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.270>
- Lotan, M., Ailam, G., & Bitron, M. (1967). Photographic Method for Determining the Spread Factor of Droplets on Slides. *Journal of Colloid and Interface Science*, 23(1), 140-153. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(67\)90095-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(67)90095-1)
- Novak, V.I., & Kozlov, V.A. (2012). Obzor sovremennykh sposobov obogashcheniya ugol'nykh shlamov. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'*, (5), 130-138.
- Rafaqat, U., Akhtar, J., Sheikh, N.U., & Munir, S. (2015). Cleaning of Dukki (Baluchistan) Coal by Oil Agglomeration Process. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 9(1), 79-88. <https://doi.org/10.1504/ijogct.2015.066948>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2008). Amenability of Muzret Bituminous Coal to Oil Agglomeration. *Energy Conversion and Management*, 49(12), 3684-3690. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.026>
- Serhieiev, P.V. (2008). *Rozvytok naukovykh osnov selektyvnoi flokulyatsii vuhillia hidrofobnyimi orhanichnyimi reahentamy*. Ph.D. Natsionalnyi Hirnychiy Universytet.
- Shebzukhova, M.A., & Shebzukhov, A.A. (2010). Uravnenie sostoyaniya perekhodnogo sloya v odnokomponentnoy sisteme i nekotorye ego primeneniya. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 74(8), 1233-1236.
- Singh, A.V., Bhargava, P.K., Singh, R., & Menaria, K.L. (2012). The Selective Oil Agglomeration of Combustibles in Fines of Low Grade Lignite of Barmer Rajasthan (India). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34(16), 1491-1496. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.485174>
- Smyrnov, V.O., & Biletskyi, V.S. (2010). *Flotatsiini metody zbahachennia korysnykh kopalyn*. Donetsk: Skhidnyi vydavnychiy dim.
- Temel, H.A. (2010). The Aggloflotation of a Mixture of Subbituminous Coal and Gangue Minerals Using Şirnak Asphaltite and the Concentrate Obtained from Zonguldak Bituminous Coal. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(13), 1248-1259. <https://doi.org/10.1080/15567030802706762>
- Trass, O., Vasquez, E.R., Campbell, P.D., Gandolfi, E.A.J., & Koka, V.R. (1994). Modified Oil Agglomeration Process for Coal Beneficiation. Iv. Pilot-Plant Demonstration of the Simultaneous Grinding-Agglomeration Process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72(1), 113-118. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450720117>
- Wang, Q., Kashiwagi, N., Apaer, P., Chen, Q., Wang, Y., & Maezono, T. (2010). Study on Coal Recovery Technology from Waste Fine Chinese Coals by a Vegetable Oil Agglomeration Process. *The Sustainable World*, (142), 331-342. <https://doi.org/10.2495/sw100311>
- Zlobina, E.S., Papin, A.V., & Ignatova, A.Yu. (2016). Obogashchenie tverdykh uglevodorodnykh otkhodov metodom maslyanoy aglomeratsii. *Math Designer*, (1), 18-21.
- Zimon, A.D. (1974). *Adgeziya zhidkosti i smachivanie*. Moskva: Khimiya.

Результати. Встановлено основні технологічні чинники, що визначають результат окремих фаз процесу масляної агрегації вугілля: “зустріч” – крупність зерен вугілля і крапель реагенту, число Re, параметри: густина вугілля і рідини; кінематична в’язкість; дисипація енергії за одиницю часу; “зближення” – фактор рН, поверхнево-активні речовини, температура водного середовища; перепад температур між середовищем і агрегатуєтворюючими об’єктами, форма зерен; “прорив водної плівки” – ті ж фактори, що і для фази “зближення” плюс відносна швидкість об’єктів, їх маса, в’язкість води; “розтікання” – в’язкість масла-зв’язуючого, хімічні взаємодії “реагент – вугілля”, градієнт поверхневого натягу масла, об’єм краплі масла, кінетична енергія об’єктів агрегатуєтворення.

Наукова новизна. Виявлено механізм контакту агрегатів-утворюючих об’єктів – вугільних зерен і реагенту за окремими фазами суб-процесу контакту: зустріч об’єктів – зближення об’єктів – прорив водної плівки – розтікання реагенту.

Практична значимість. Результати досліджень дають можливість направлено пошуку шляхів інтенсифікації селективної агрегації вугілля. Виділені технологічні фактори, які підвищують ефективність процесу агрегатуєтворення при масляній агрегації (агломерації, грануляції) тонкодисперсного вугілля.

Ключові слова: масляна агрегація вугілля, феноменологічна модель процесу, механізм контакту агрегатуєтворюючих об’єктів, лабораторні дослідження, фактори інтенсифікації процесу

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Исследовать отдельные фазы процесса контакта “реагент – угольное зерно” при масляной агрегации угля, в частности, анализ таких фаз процесса контакта: фаза “встреча агрегатообразующих объектов”, фаза “сближения”, фаза “прорыв водной пленки”, фаза “растекание реагента”. Установить основные технологические факторы, определяющие результат указанных фаз процесса масляной агрегации угля, факторы интенсификации процесса.

Методика. В работе использован комплексный метод исследований, включающий лабораторные экспериментальные исследования процесса масляной агрегации угля, микроскопию, рН-метрию.

Результаты. Установлены основные технологические факторы, которые определяют результат отдельных фаз процесса масляной агрегации угля: “встреча” – крупность зерен угля и капель реагента, число Re, параметры: плотность угля и жидкости; кинематическая вязкость; диссипация энергии за единицу времени; “сближение” – фактор рН, поверхностно-активные вещества, температура водной среды; перепад температур между средой и агрегатообразующими объектами, форма зерен; “прорыв водной пленки” – те же факторы, что и для фазы “сближение” плюс относительная скорость объектов, их масса, вязкость воды; “растекание” – вязкость масла-связующего, химические взаимодействия “реагент – уголь”, градиент поверхностного натяжения масла, объем капли масла, кинетическая энергия объектов агрегатообразования.

Научная новизна. Вывявлен механізм контакту агрегатообразующих объектов – угольных зерен и реагента по отдельным фазам суб-процессу контакту: встреча объектов – сближение объектов – прорыв водной пленки – растекание реагента.

Практическая значимость. Результаты исследований дают возможность направленного поиска путей интенсификации селективной агрегации угля. Выделены технологические факторы, которые повышают эффективность процесса агрегатообразования при масляной агрегации (агломерации, грануляции) тонкодисперсного угля.

Ключевые слова: масляная агрегация угля, феноменологическая модель процесса, механізм контакту агрегатообразующих объектов, лабораторные исследования, факторы интенсификации процесса

ARTICLE INFO

Received: 8 June 2017

Accepted: 21 November 2017

Available online: 23 November 2017

ABOUT AUTHORS

Volodymyr Biletskyi, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Oil, Gas and Condensate Extraction, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 85 Pushkinska St, 61023, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ukcdb@i.ua

Petro Molchanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Equipment of Oil and Gas Fields, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24 Pershotravnevyi Ave., 020/1-A, 36011, Poltava, Ukraine. E-mail: kafedraongp@i.ua

Vitalii Orlovskyy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Equipment of Oil and Gas Fields, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24 Pershotravnevyi Ave., 020/1-A, 36011, Poltava, Ukraine. E-mail: kafedraongp@i.ua

Leonid Shpylovyi, Candidate of Technical Sciences, Director of the LLC “Azov-Mineraltekhnik”, 1a Pershotravneva St, 85771, Dmytrivka, Ukraine. E-mail: mineraltech.azov@gmail.com