

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УЛОВЛЮВАННЯ ЧАСТИНОК ЛЕТКОЇ ЗОЛИ КРАПЛЯМИ

Обґрунтовано підхід до визначення ефективності уловлювання частинок легкої золи краплями, який ґрунтується на вимірюванні параметра коагуляції. Розроблено методику та створено експериментальну установку, яка надає можливість досліджувати закономірності взаємодії крапель із твердими частинками. Встановлено вплив відносної швидкості частинка – крапля та розміру частинок на параметр коагуляції.

Ключові слова: мокра очистка димових газів, краплі, тверді частинки, параметр коагуляції

Типова ТЕС потужністю 1000 МВт спалює за рік понад 3 млн т вугілля і викидає в атмосферу, крім низки інших речовин, 10...20 тис. т золи. У легкої золі донецького вугілля міститься по 100...200 г/т таких важких металів, як кобальт, нікель, мідь, цинк, свинець, значна кількість токсичних елементів (миш'яку, ртуті) та радіоактивні ізотопи урану, торію, калію та ін. [1]. Тому очистка димових газів пиловугільних котлів від легкої золи є важливим завданням екологізації теплової енергетики.

Згідно з чинними нормами ефективність очистки вмісту димових газів повинна сягати 99,6...99,8 %. Проте найбільш поширені апарати для очистки – електрофільтри – забезпечують ефективність до 97...98 %. Апарати для мокрої очистки, які також широко використовуються в енергетиці України, також не відповідають чинним вимогам, але можливості істотного покращення їх роботи ще далеко не вичерпані. Для розв'язання цього завдання потрібно побудувати методи розрахунку та оптимізації робочого процесу в таких апаратах. У цій статті описано перший крок досліджень у вказаному напрямку.

Процес мокрої очистки газів від частинок золи або пилу слід визнати вивченим вкрай недостатньо. У нечисельних роботах, присвячених цьому питанню, використовується спрощений підхід, який будемо називати інтегральним (див., наприклад, [2, 3]). Тут всі параметри процесу (звичайно, крім концентрації частинок) вважаються незмінними по довжині потоку, розглядаються монодисперсні краплі і частинки, виводиться й інтегрується аналітично

наближене рівняння відносно концентрації. Крім використання необґрунтованих гіпотез, такий підхід має ще один суттєвий недолік: не враховується можливість відскоку частинки від поверхні краплі, що найбільш імовірно при дотичних зіткненнях. Таким чином, інтегральний підхід не може дати надійну інформацію щодо інтенсивності процесів переносу у трифазовому середовищі.

Набагато інформативнішим є диференціальний підхід, де всі параметри вважаються змінними по довжині потоку і процес описується системою диференціальних рівнянь, що враховують всю різноманітність фізичних явищ у потоці. Відзначимо, що подібна модель повинна бути напівемпіричною, оскільки знайти аналітично або числовими методами імовірність коагуляції при зіткненні частинки з краплею, мабуть, неможливо. Тому метою даної роботи, а саме, першого етапу зазначеного вище підходу, є експериментальне дослідження імовірності коагуляції крапель із частинками залежно від параметрів взаємодії.

Методика експериментального дослідження взаємодії крапель із твердими частинками. Матеріальний баланс процесу уловлювання твердих частинок краплями можна охарактеризувати параметром коагуляції Ψ_{ji} , який являє відношення маси уловлених частинок за певний час до маси частинок, що зіткнулися з краплями. Природно, параметр коагуляції може набувати лише позитивних значень, при $\Psi_{ji} = 1$ відбувається повна коагуляція частинок, а при $\Psi_{ji} < 1$ – часткова. Окремо зазначимо, що параметр Ψ_{ji} характеризує ймовірність коагуляції при зіткненнях частинок з краплями (тобто мікроявище) і не є характеристикою уловлювання частинок в апараті. Ступінь уловлюван-

ня визначається конструктивними особливостями апарата, які повинні забезпечувати високу імовірність зіткнень твердих частинок з краплями та їх ефективну коагуляцію.

Залежно від гідродинамічних умов взаємодії, розмірів та фізичних властивостей крапель і твердих частинок процес уловлювання золи із димових газів може бути більш чи менш ефективним. Тому було проведено аналіз факторів, які впливають на закономірності коагуляції, і визначено низку розмірних величин, від яких залежить цей процес. До них належать: діаметр крапель δ_j ; розмір твердих частинок Δ_j ; відносна швидкість зіткнення крапель із частинками u_{ji} ; густина твердої речовини ρ_s ; густина рідини ρ_l ; коефіцієнт поверхневого натягу σ ; коефіцієнт динамічної в'язкості рідини η_l . Отже, сім розмірних величин суттєво впливають на процес коагуляції. Оскільки ці величини містять три первинні розмірності (кг, м, с), то згідно з π -теоремою вказаний процес має описуватися чотирма числами подібності. У загальному вигляді залежність параметра коагуляції від чисел подібності (рівняння подібності) може бути записана як

$$\Psi_{ji} = f(Re_{ji}, We_{ji}, \Gamma_{ji}, R),$$

де $Re_{ji} = \Delta_j u_{ji} \rho_l / \eta_l$ – число Рейнольдса; $We_{ji} = \Delta_j^2 u_{ji}^2 \rho_s / (\delta_j \sigma)$, – модифіковане число Вебера; $\Gamma_{ji} = \delta_j / \Delta_j$ – відношення розмірів частинок; $R = \rho_s / \rho_l$ – відношення їх густин.

Розміри частинок леткої золи, що виносяться димовими газами пиловугільних котлоагрегатів, становлять в основному 1...100 мкм. Кількість частинок, розміри яких більші за 100 мкм, як правило, не перевищує 7 %. Діаметри крапель, що розбризкуються в існуючих апаратах для мокрої очистки (зокрема, у скруберах із трубами Вентури), становлять від 200 до 1000

Таблиця 1

Параметр	Діапазон значень параметрів взаємодії крапель із твердими частинками	
	Реальний процес	Експеримент
Γ_{ji}	2...200	1,5...200
R	1,9...2,5	2,4...2,7
Re_{ji}	50...6000	40...6000
We_{ji}	0,07...5350	0,07...5500
Δ_j , мкм	1...100	20...1500
δ_j , мкм	200...1000	2200...5200
u_{ji} , м/с	10...60	1...14
ρ_s , кг/м ³	1900...2500 (летка зола)	2700 (кварцовий пісок)

мкм. Відносні швидкості взаємодії частинок залежно від типу апарата знаходяться у діапазоні від 5...10 до 60 м/с. Очевидно, організація експерименту із частинками таких розмірів та високими швидкостями їх взаємодії є дуже непростю задачею. Тому було вирішено провести модельне експериментальне дослідження взаємодії монодисперсних крапель води і водогліцеринових розчинів із вузькими фракціями кварцового піску. Відзначимо, що вибір водогліцеринових розчинів як робочої рідини пов'язаний із сильною залежністю їх в'язкості від об'ємної концентрації гліцерину, що дає можливість легко змінювати число Рейнольдса.

Як відомо, умовою коректності фізичного моделювання є рівність усіх чисел подібності в реальному процесі та модельному експерименті. Тому було обчислено можливі значення чисел подібності в апаратах для мокрої очистки газів, які наведено у табл. 1. Потім було підібрано такі значення Δ_j , δ_j та u_{ji} в експерименті, які забезпечують приблизно такі самі числа подібності (див. табл. 1). У табл. 2, як приклад, наве-

Таблиця 2

Приклад	Процес	Δ_j , мкм	δ_j , мкм	u_{ji} , м/с	σ , %	Γ_{ji}	R	Re_{ji}	We_{ji}
1	реальний	5	200	10	0	40	2,2	50	0,37
	модель	80	3000	2,1	40	38	2,4	49,5	0,36
2	реальний	100	200	10	0	2	2,2	1000	148
	модель	1500	2900	2,3	40	1,9	2,4	1018	159
3	реальний	55	200	20	0	3,6	2,2	1100	180
	модель	1500	5200	2,5	45	3,5	2,4	1106	164
4	реальний	10	200	40	0	20	2,2	400	23,8
	модель	225	4500	7,5	45	20	2,4	401	24,9

дено характеристики кількох режимів взаємодії, що свідчать про відповідність експерименту і реального процесу (тут c – концентрація гліцерину у водному розчині).

Методика експерименту щодо визначення параметра коагуляції Ψ_{ji} полягає у такому. На експериментальному стенді, який описано нижче, організовується горизонтальний потік повітря певної швидкості. У потік вводяться тверді частинки необхідної фракції. Таким чином, утворюється стаціонарний двофазовий струмінь, який імітує димові гази з частинками золи.

Через потік повітря з частинками організовується рух вільно падаючих монодисперсних крапель робочої рідини. Частинки зіштовхуються з краплями, і певна частина їх уловлюється.

Краплі з уловленими твердими частинками (двокомпонентні частинки) збираються у спеціальній ємності. Потім за допомогою фільтрації і випаровування тверда фаза відділяється від рідини, і ваговим методом визначається маса m_c твердих частинок, яка коагулювала з краплями в процесі взаємодії.

Для визначення маси частинок, що зіштовхнулися з краплями в процесі дослідження, використовується метод, суть якого полягає у такому. Для дослідження беремо порцію частинок певної маси, яка у складі двофазового струменя вилітає з сопла й уловлюється спеціальною ємністю. Якщо падіння крапель через потік відсутнє, то вся маса частинок уловлюється без втрат. Якщо ж є взаємодія крапель із двофазовим потоком, то деякі частинки уловлюються краплями, а інші після зіткнення відскакують від крапель, що найбільш імовірно при дотичних ударах. Оскільки траєкторії цих частинок відхиляються від початкових, вони не потрапляють в ємність для уловлювання двофазового струменя. По різниці уловлених мас без падіння крапель та з їх падінням визначається маса m_a всіх твердих частинок, що зіштовхнулися з краплями у процесі експерименту. Крім того, маса m_a обчислюється за наближеною формулою

$$m_a = G_j \delta_i^2 / (D u_i),$$

де G_j – масова витрата твердих частинок; D – діаметр двофазового потоку в перетині падіння крапель; u_i – середня швидкість падіння крапель через двофазовий струмінь.

Нарешті, для кожного дослідження визначається параметр коагуляції:

$$\Psi_{ji} = m_c / m_a.$$

Експериментальна установка. На рис. 1 показано принципову схему експериментальної установки для дослідження взаємодії крапель із твердими частинками. Конструктивно вона складається з двох окремих систем – організації двофазового потоку (повітря з твердими частинками) та генерації вільно падаючих монодисперсних крапель. Ці системи спроектовано так, щоб забезпечити високу ймовірність зіткнення твердих частинок із краплями.

З компресора 1 потік повітря через регулюючий вентиль 2 надходить у ротаметр 3. Тиск повітря в магістралі визначається за допомогою манометра 4. У магістралі встановлено запобіжний клапан 5. Регулюючий вентиль 2 дозволяє встановлювати необхідний робочий тиск та витрату повітря. Ротаметр 3 попередньо піддається таруванню у діапазоні витрат, що необхідні для проведення експериментів. З ротаметра через трубопровід 6 повітря надходить у змішувач 7 ежекційного типу, до якого подаються тверді частинки 8 (кварцовий пісок) із воронкоподібної ємності (бункера) 9 через дозатор 10. Пісок підхоплюється потоком повітря, і формується двофазова суміш, яка витікає із сопла 11 (трубки діаметром 6,7 мм). Змінні дозатори 10 призначені

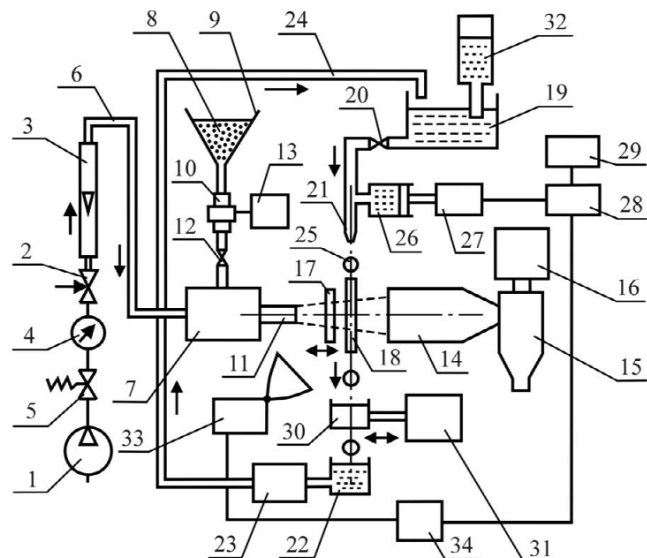


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження взаємодії крапель із твердими частинками

для регулювання подачі твердої фази в потік і являють собою набір спеціальних каналів з певними перетинами, що забезпечує різну концентрацію твердих частинок у двофазовому струмені. За допомогою затискача 12 перекривається або відкривається подача частинок. Швидкість потоку на зрізі сопла визначається за відомими витратою повітря (за показаннями ротаметра) та діаметром сопла. Для запобігання залягання піску у бункері 9 використовується вібратор 13, який накладає коливання на пристрій подачі. Амплітуда пульсацій вібратора може змінюватись регулюванням напруги частотою 50 Гц, яка подається на електромагніт, пов'язаний спеціальною тягою з каналом подачі частинок.

Під час дослідів двофазова суміш після сопла 11 пролітає деяку відстань і потрапляє в уловлювач 14. Далі потік з частинками надходить до циклона 15, де тверда фаза відділяється від повітря. Пілосос 16 забезпечує відсмоктування повітря з циклона. Після завершення експерименту тверді частинки видаляються з циклона з метою визначення їх маси.

Змонтована на стенді система генерації вільно падаючих монодисперсних крапель працює таким чином. Рідина з ємності 19 через регулюючий вентиль 20 надходить до капіляра 21, з якого вона витікає у вигляді струменя. Система генерації крапель складається з пульсаційного насоса 26 поршневого типу, електромагніта 27, який забезпечує зворотно-поступальний рух поршня, блока управління пристроєм 28 та цифрового лічильника пульсацій 29. Насос 26, поршень якого може рухатися з певними частотою й амплітудою, накладає пульсації тиску на рідину, що витікає. За рахунок пульсацій тиску струмінь розпадається на монодисперсні краплі 25. Далі краплі потрапляють в уловлювач 22, звідки за допомогою циркуляційного насоса 23 по трубопроводу 24 рідина повертається в ємність 19. Таким чином, організовується циркуляція рідини у замкненому контурі, яка потрібна для стабілізації характеристик витрати рідини через капіляр. Залежно від фізичних властивостей рідини, що циркулює в контурі стенда, для забезпечення стабільної генерації монодисперсних крапель за допомогою вентилля 20 регулюються витрата рідини через капіляр та, завдяки спеціальному пристрою на електромагніті 27, амплітуда пульсацій поршня. Оптимальні значення вказаних параме-

трів встановлюються при випробуваннях та налагодженні роботи стенда.

Під час проведення дослідів використання змінних капілярів 21 з різними діаметрами дає можливість регулювати розміри монодисперсних крапель. Їх діаметр визначається ваговим методом – за їх кількістю і загальною масою, яка визначається на аналітичних терезах.

Для уловлювання крапель, з якими коагулювали тверді частинки, призначено спеціальний вузол, до якого входять ємність 30 для уловлювання двокомпонентних частинок та пристрій 31 для переміщення ємності до траєкторії падіння крапель.

Для відбору й ідентифікації твердих частинок, які рухаються разом із потоком повітря, а також для визначення розподілу твердих частинок по перетину двофазового струменя, якщо виникає потреба, використовується спеціальний пристрій, який складається з двох елементів: конструкції типу шторки 17 та екрана 18. Цей пристрій зроблено так, що шторка і екран можуть на деякий час підводитись і перетинати двофазовий потік у площині, перпендикулярній до напрямку його руху, там, де проходить траєкторія падіння крапель (генерація крапель у цей час відсутня). При цьому спеціальна конструкція шторки (шторно-щілинний затвор) дозволяє їй швидко рухатися для короткочасного пропуску повітря з частинками. Тверді частинки, що за відомий час пролетіли через відкриту шторку пристрою, осаджуються на прозорому екрані 18, на поверхню якого попередньо нанесено липку речовину. Далі екран фотографується цифровою камерою, і фотозображення обробляється спеціально розробленим комп'ютерним методом з метою визначення розмірів частинок, їх кількості та розподілу по перетину потоку.

Під час дослідів з ємності 19 відбирається рідина для формування крапель. Для збереження рівня рідини і стабільного генерування крапель використовується підживлювач 32, який поповнює ємність 19, так що у ній зберігається постійний рівень.

Для візуалізації процесу генерації монодисперсних крапель та їх взаємодії з твердими частинками використовується система стробоскопічного освітлення. До неї входять стробоскоп 33 та синхронізатор 34, з'єднаний із блоком управління 28. У процесі роботи забезпечується синхронізація спалахів світла стробоскопа з частотою генерування крапель.

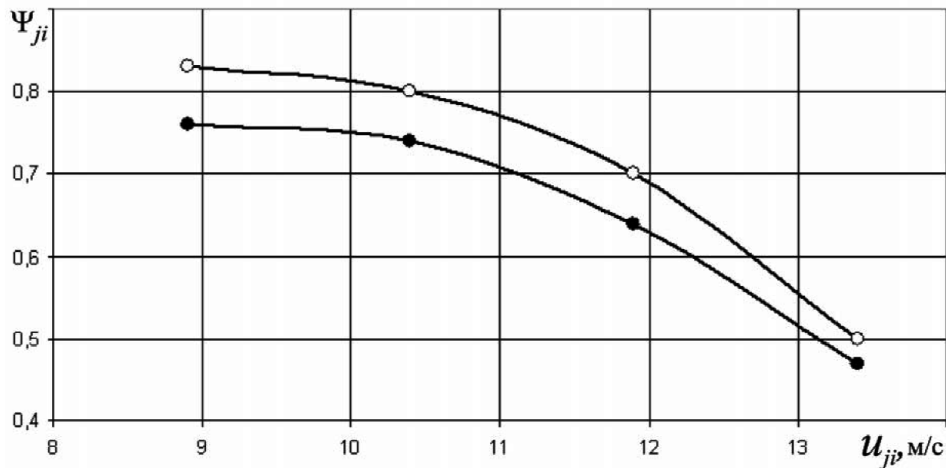


Рис. 2. Залежність параметра коагуляції від відносної швидкості крапель та твердих частинок із середнім розміром фракцій: • – $\Delta_j = 380$ мкм, о – $\Delta_j = 150$ мкм

Таким чином, описана експериментальна установка дозволяє отримувати вільно падаючі монодисперсні краплі рідини різного розміру та двофазовий потік з певною швидкістю та концентрацією твердої фази, а також забезпечувати взаємодію твердих частинок із краплями та виконувати необхідні вимірювання.

Приклад дослідних даних. В експериментах використовуються вузькі фракції твердих частинок – кварцового піску. За допомогою лабораторних сит підготовлено такі фракції: 0...0,04; 0,04...0,063; 0,063...0,08; 0,08...0,1; 0,1...0,14; 0,14...0,16; 0,16...0,2; 0,2...0,25; 0,25...0,5; 0,5...0,8; 0,8...1,0; 1,0...1,4 мм. Діаметр монодисперсних крапель, що взаємодіяли з частинками, мав значення від 2,2 до 5,2 мм.

У процесі досліджень вивчали вплив відносної швидкості крапель та твердих частинок, а також їх розмірів на процес коагуляції. Відзначимо, що швидкість руху частинок у момент взаємодії з краплями визначали аналітично з урахуванням їх ковзання в потоці повітря.

На рис. 2, як приклад, показано вплив відносної швидкості u_{ji} на параметр коагуляції Ψ_{ji} . Діаметр крапель в умовах експерименту становив 5 мм, а розміри фракцій піску – 0,25...0,5 мм та 0,14... 0,16 мм. Швидкість двофазового потоку не перевищувала рівня, за якого його дія могла б зруйнувати або істотно деформувати краплю (припустима була незначна деформація [4]).

Досліди показали, що збільшення швидкості взаємодії приводить до зменшення параметра коагуляції. Більш крупна фракція частинок гірше коагулює з краплями.

ВИСНОВКИ

Для покращення показників уловлювання легкої золи в апаратах для мокрої очистки димових газів, удосконалення моделей, що описують цей процес, а також для оптимізації роботи таких апаратів необхідна інформація щодо ймовірності коагуляції при взаємодії твердих частинок з краплями.

Авторами розроблено методику та створено експериментальний стенд для вимірювання параметра коагуляції, завдяки цьому визначено залежність параметра коагуляції від відносної швидкості тверда частинка – крапля та розміру частинок.

1. Кропн Л.И., Стырикович М.А., Хорьков А.В. Использование энергетических углей и экологические стандарты // Теплоэнергетика. – 1997. – № 2. – С. 7–12.
2. Kim H.T., Jung C.H., Oh S.N., Lee K.W. Particle removal efficiency of wet gravitational scrubber considering impaction, interception, diffusion // Environ. Eng. Sci. – 2001. – Vol. 18, N 2. – P. 125–136.
3. Mohan B.R., Jain R.K., Meikap B.C. Comprehensive analysis of prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber // Separ. Purif. Technol. – 2008. – Vol. 63. – P. 269–277.
4. Shraiber A.A., Podvysotsky A.M., Dubrovsky V.V. Deformation and breakup of drops by aerodynamic forces // Atomization and Sprays. – 1996. – Vol. 6. – N 6. – P. 667–692.

Надійшла до редколегії: 16.05.2011