

ОСАДЖЕННЯ ЗОЛОВИХ ЧАСТИНОК НА СФЕРИЧНІ КОЛЕКТОРИ У ПРИСТРОЯХ ДЛЯ МОКРОЇ ОЧИСТКИ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Проаналізовано існуючі методи розрахунку коефіцієнта інерційного осадження частинок на сферичний колектор. Отримано залежність для визначення коефіцієнта осадження при проміжних між в'язким і потенціальним режимах обтікання колекторів. Проведено зіставлення залежності з відомими експериментальними даними. З використанням отриманої залежності виконано розрахунки ефективності очищення димових газів від легкої золи апаратами двох типів – порожнистим скруббером і скруббером Вентурі.

Ключові слова: мокра очистка димових газів, коефіцієнт осадження, колектори, краплі, частинки золи.

Під час спалювання вугілля на теплових електростанціях (ТЕС) утворюються продукти згоряння, які складаються з дисперсійної газової фази і завислих у ній полідисперсних твердих (золених) та рідких частинок. Очищення газових викидів ТЕС від шкідливих домішок було і залишається важливим завданням енергетики. З огляду на зростаючі вимоги з охорони навколишнього середовища, ефективне вирішення цього завдання є актуальним.

Залежно від умов, в яких відбувається видалення дисперсної фази, існуюче обладнання для очистки димових газів можна поділити на дві групи. До першої з них відносяться апарати, в яких частинки уловлюються без участі рідини (апарати сухої очистки). До другої групи відносяться апарати мокрої очистки, в яких, крім газової фази, присутні рідини у суцільному чи дисперсному вигляді.

Очисні пристрої цієї групи в теплоенергетиці України становлять близько 40 %. Зокрема, інерційні зололовлювачі (мокрі скрубери) отримали поширення на вугільних котлах паропродуктивністю від 100 до 640 т/год. Принцип дії апаратів ґрунтується на уловлюванні частинок золи при їх взаємодії з колекторами (краплями рідини чи поверхнями, вкритими її плівкою). Краплі утворюються розбризкуванням рідини форсунками і (або) потоком газу.

Апарати для мокрої очистки прості у виготовленні, стійкі в роботі, не зашлаковуються золовими відкладеннями. Капітальні витрати на спорудження пристроїв цього типу невеликі, а їх обслуговування потребує мінімальних витрат. До недоліків пристроїв відноситься

порівняно низький ступінь очищення E , який не дозволяє досягти сучасних європейських екологічних вимог.

Ефективність апаратів мокрої очистки значною мірою залежить від особливостей взаємодії частинок з колекторами (краплями чи плівками рідини). Вивчення цього явища дозволить запропонувати шляхи удосконалення таких апаратів.

Фундаментальною характеристикою взаємодії частинки з колектором будь-якої форми є коефіцієнт осадження η . Підведення золових частинок до поверхні колекторів і взаємодія з ними зумовлюються в основному дією інерційних, гідродинамічних, електростатичних сил, а також дифузії. Метою цієї роботи є отримання залежності для розрахунку коефіцієнта η лише від інерційного механізму підведення частинок до поверхні сферичного колектора. Зважаючи на велике практичне значення інерційного осадження частинок на тілах різної форми, вивченню цього механізму надається значна увага (див., наприклад, [1–7]).

Обтікання колектора потоком газу будемо розглядати у двовимірній постановці з огляду на його симетричність. Схему обтікання наведено на рис. 1. Тут введено такі позначення: U_∞ – швидкість газу вдалині від колектора, d – його діаметр, r – радіус-вектор. Коефіцієнт осадження η частинки на колектор (ефективність уловлювання) визначається за формулою $\eta = 4(y_0/d)^2$, де y_0 – найбільша за модулем ордината точки старту частинки, за якої ще відбувається зіткнення.

Теоретичне визначення цього коефіцієнта зводиться до розв'язання рівнянь руху частинок у заданому полі швидкостей газового потоку. За

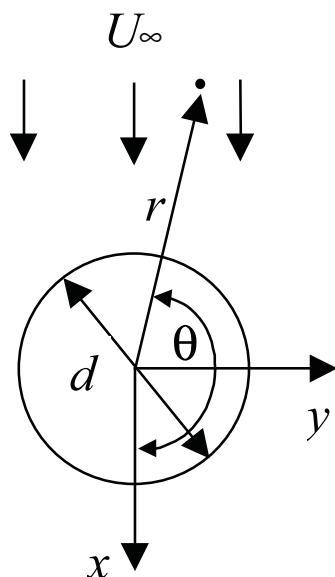


Рис. 1. Схема обтікання

відсутності зовнішніх сил удалині від колектора швидкості частинок і газу приймаються рівними, і за допомогою розв'язання рівнянь руху частинок з різними початковими координатами знаходиться гранична траєкторія. Таким чином, задача знаходження η зводиться до багаторазового розв'язання задачі Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь.

Проте такий шлях пов'язаний з деякими незручностями. Вони полягають у тому, що у кожному конкретному випадку необхідно багаторазово розв'язувати досить складні диференціальні рівняння руху газу і частинок. Зручніше мати просту "емпіричну" формулу для розрахунку коефіцієнта осадження як функції вихідних величин, характерних для процесу обтікання колектора двофазовим потоком.

Виконаний нами аналіз розмірностей фізичних величин, від яких залежить результат взаємодії частинки з колектором, показав, що у загальному випадку ефективність інерційного осадження η є функцією трьох чисел подібності: Re , Stk , δ/d . Тут Re – число Рейнольдса, $Re = U_\infty d/\nu$; Stk – число Стокса, $Stk = U_\infty \rho_p \delta^2 / (18\nu\rho d)$; δ , ρ_p – діаметр частинок і їх густина; ν , ρ – в'язкість і густина газу. Згідно з [2] внесок δ/d у величину η стає помітним лише при наближенні розмірів частинок до діаметра колектора. Такі ситуації нехарактерні для процесів мокрої очистки газів. Тому в даній роботі будемо розглядати вплив на коефіцієнт інерційного осадження лише двох чисел подібності – Re і Stk .

Проаналізуємо відомі результати побудови залежностей $\eta(Re, Stk)$. Класичними є дані теоретичних розрахунків коефіцієнта інерційного осадження, виконані Ленгмюром при обтіканні перешкод різної форми [1]. Більшість розрахунків виконано за умови, що перешкоди обтікаються потенціальним потоком при достатньо високих значеннях числа Рейнольдса. Декілька розрахунків виконано для випадку обтікання перешкод в'язким потоком.

За отриманими результатами в роботі [1] запропоновано залежності для визначення ефективності інерційного осадження частинок на тілах сферичної форми. При потенціальному ($Re \rightarrow \infty$) обтіканні в області значень $Stk \geq 0,1$:

$$\eta_p = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,25)^2}. \quad (1)$$

Для в'язкого обтікання ($Re \rightarrow 0$, $Stk \geq 0,607$) отримано формулу

$$\eta_v = \left[1 + \frac{0,75 \ln(4Stk)}{2Stk - 1,214} \right]^2. \quad (2)$$

Для гідродинамічної області, проміжної між в'язким і потенціальним обтіканням, Ленгмюром на базі інтуїтивних уявлень запропонована інтерполяційна залежність

$$\eta = \frac{60\eta_v + Re\eta_p}{Re + 60}, \quad (3)$$

яка в роботах [2, 4] піддається справедливій критиці.

Зокрема, в роботі [4] з використанням відомих даних [8] про швидкості газового потоку, отриманих при розв'язанні рівнянь Нав'є–Стокса для чисел $Re = 0,01 - 400$, проведено числові розрахунки коефіцієнта осадження і зіставлення його з формулою (3). Результати розрахунків наведено в роботі [4] у вигляді графічних залежностей, які зображено на рис. 2. Тут $y_{co} = \sqrt{\eta}$, $K = 2Stk$; лінії 1, 2 – розрахунки [3] для в'язкого і потенціального режимів обтікання; лінії 3–8 – розрахунки [4] для проміжних чисел Рейнольдса; штрихові лінії 9–11 – розрахунки [4] за формулою (3). З порівняння результатів, наведених на рис. 2, видно, що величини коефіцієнта осадження, розраховані в роботі [4] для проміжних між в'язким і потенціальним обтіканням значень Re , суттєво відрізняються від обчислених за формулою (3).

З огляду на те, що ці результати, як зазначають автори цитованої роботи, задовільно узго-

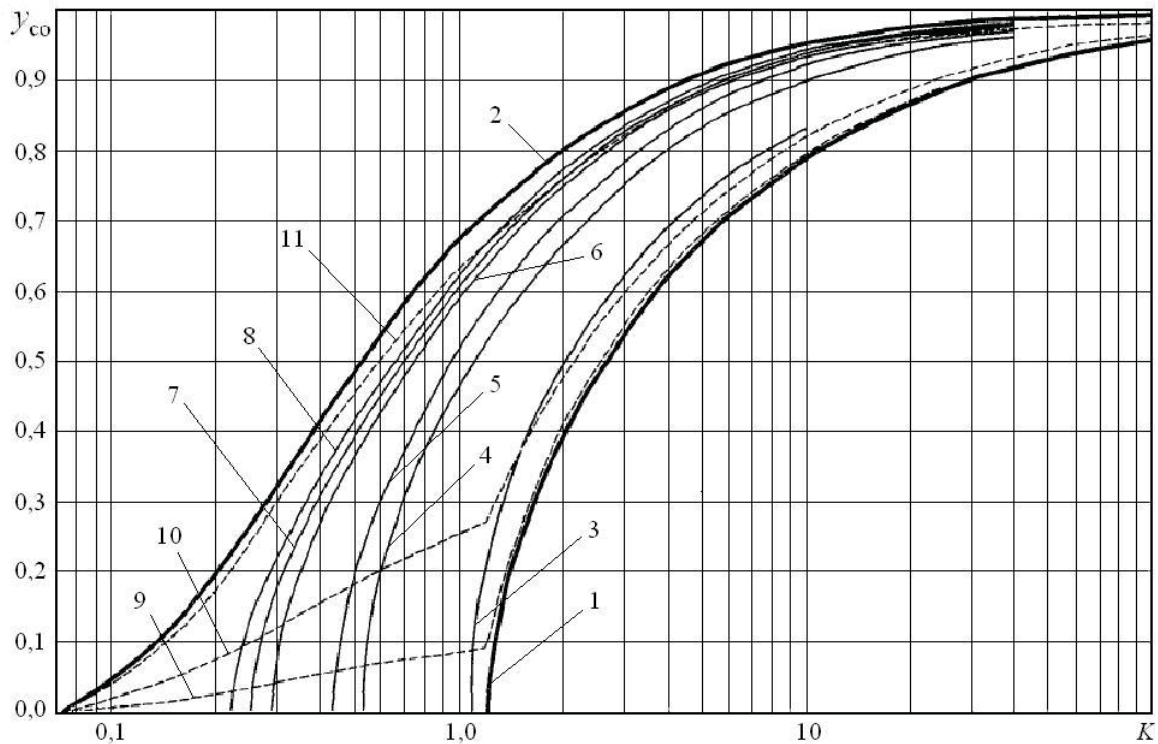


Рис. 2. Залежності $\eta_{co}(K)$ для різних чисел Рейнольдса:
 1 – в'язке обтікання; 2 – потенціальне обтікання; 3, 9 – $Re = 1$; 4, 10 – $Re = 10$; 5 – $Re = 20$; 6 – $Re = 100$;
 7 – $Re = 200$; 8, 11 – $Re = 400$

джуються з відомими експериментальними даними, їх можна було б використовувати для визначення ефективності інерційного уловлювання частинок золи краплями рідини для різних значень чисел Стокса і Рейнольдса. Але такий, графічний, метод знаходження величини незручний для практичного використання. Значно доцільніше мати аналітичну залежність коефіцієнта інерційного осадження від визначальних чисел подібності процесу.

З метою отримання такої залежності нами виконано обробку даних [4]. Під час обробки використовували величини коефіцієнта осадження η , отримані елементарними перерахунками величин η_{co} . Спочатку було сформовано масив значень $\eta(K)$ для наведених на рис. 2 фіксованих чисел Рейнольдса. Далі масив поповнювався значеннями $\eta(K)$ для певних чисел Рейнольдса, проміжних між фіксованими. Ці значення знаходились шляхом інтерполяції даних, наведених на рис. 2, для кожного вибраного числа Re . Отримані результати наведено в табл. 1.

Функціональний зв'язок між коефіцієнтом осадження і визначальними числами подібності відшукувався у формі, аналогічній рівнянню (2), а саме

$$\eta = [1 + m \ln(nK) / (K - K_*)]^{-2} \quad (4)$$

де m , n і K_* є функціями числа Рейнольдса.

Обробка даних, наведених в табл. 1, методом найменших квадратів дозволила отримати такі вирази для m , n і K_* :

$$m = \begin{cases} 0,575 - 0,145 \ln Re, & 0,1 \leq Re \leq 10; \\ 0,394 - 0,082 \ln Re + 0,005 (\ln Re)^2, & 10 \leq Re \leq 1000. \end{cases} \quad (5)$$

$$n = 2,259 \cdot 10^{-7} Re^3 - 6,857 \cdot 10^{-4} Re^2 + 0,776 Re + 1,778. \quad (6)$$

$$K_* = 5,683 [\ln(8,709 + 10Re)]^{-1,538}. \quad (7)$$

На рис. 3 наведено значення ефективності інерційного осадження, розраховані за формулою (4) (суцільні лінії), і зіставлення їх з даними [4].

З порівняння наведених залежностей видно, що результати розрахунків задовільно збігаються з даними [4].

На рис. 4 наведено зіставлення результатів експериментальних досліджень [9] (точки), в

Таблиця 1 – Коефіцієнти осадження залежно від чисел K і Re

$Re \backslash K$	1	2	4	10	20	40	100	200	400	1000
0,2										0,006
0,3									0,015	0,037
0,3							0,006	0,033	0,048	0,070
0,4						0,021	0,073	0,094	0,111	0,133
0,5					0,040	0,084	0,135	0,156	0,171	0,193
0,6				0,040	0,090	0,131	0,181	0,200	0,221	0,240
0,8			0,044	0,141	0,181	0,219	0,268	0,289	0,312	0,326
1,0		0,056	0,123	0,218	0,265	0,299	0,350	0,367	0,386	0,403
1,2	0,044	0,123	0,182	0,277	0,332	0,360	0,401	0,423	0,442	0,458
1,5	0,135	0,210	0,265	0,348	0,403	0,430	0,473	0,490	0,504	0,521
2,0	0,244	0,308	0,367	0,444	0,498	0,516	0,560	0,576	0,598	0,608
3,0	0,386	0,441	0,494	0,566	0,613	0,627	0,664	0,679	0,696	0,709
4,0	0,479	0,526	0,573	0,643	0,689	0,709	0,734	0,748	0,757	0,764
6,0	0,585	0,624	0,664	0,733	0,774	0,789	0,801	0,810	0,821	0,832
8,0	0,648	0,689	0,717	0,774	0,821	0,830	0,841	0,852	0,861	0,870
10,0	0,689	0,729	0,759	0,810	0,854	0,859	0,869	0,876	0,885	0,893
20,0	0,800	0,832	0,852	0,884	0,908	0,916	0,924	0,931	0,937	0,943
30,0	0,848	0,865	0,882	0,912	0,922	0,931	0,941	0,946	0,953	0,956
40,0	0,882	0,891	0,901	0,922	0,929	0,939	0,945	0,951	0,956	0,962
60,0	0,906	0,914	0,922	0,933	0,939	0,945	0,951	0,956	0,962	0,968
80,0	0,927	0,933	0,939	0,945	0,951	0,956	0,962	0,966	0,970	0,974
100,0	0,933	0,939	0,945	0,951	0,956	0,962	0,968	0,972	0,976	0,980

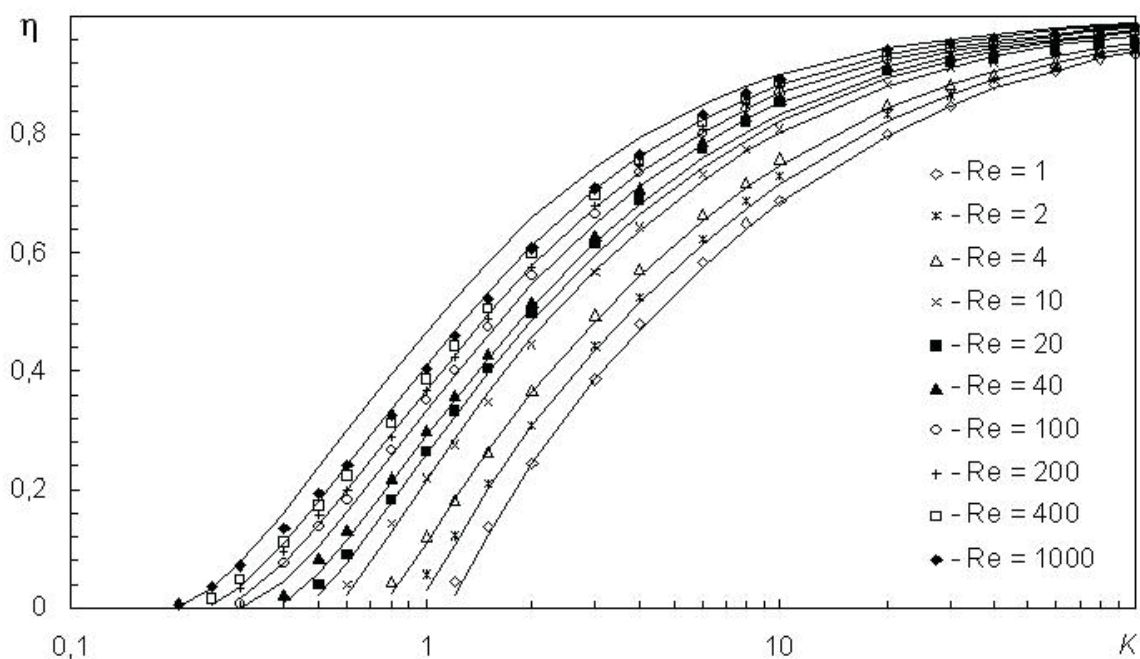


Рис. 3. Залежність $\eta(Re, K)$

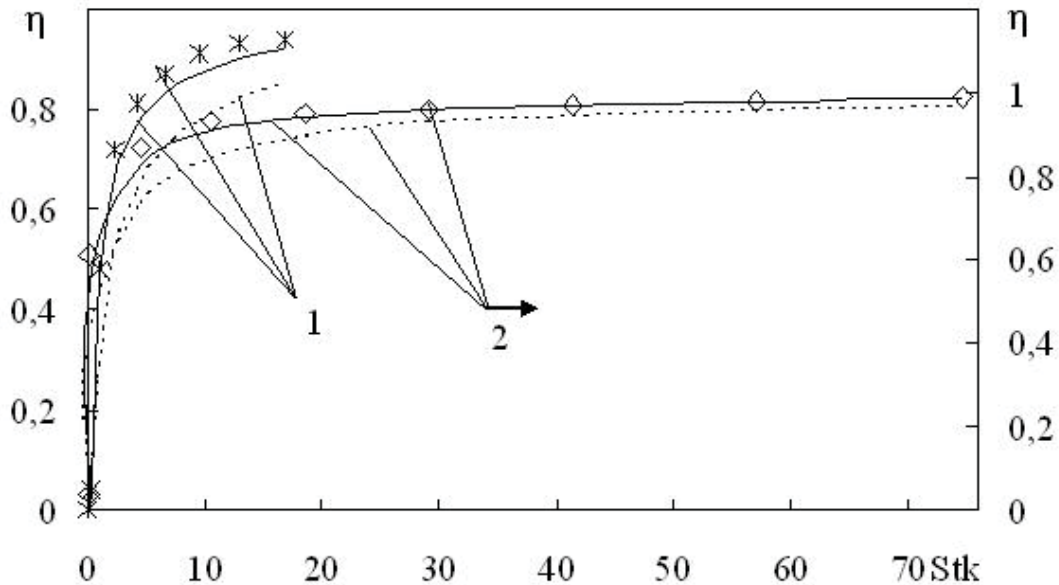


Рис. 4. Залежність $\eta(\text{Stk})$:
 1 – $\text{Re} = 10, d = 200 \text{ мкм}$; 2 – $\text{Re} = 40, d = 400 \text{ мкм}$

яких визначались коефіцієнти осадження дрібних крапель води на крупних, і значень цього коефіцієнта, розрахованих для умов дослідів за формулою (4) (суцільні лінії) і (3) (штрихові лінії).

Зауважимо, що в роботі [9] не вказано діапазон швидкостей газу, в якому проводились вимірювання коефіцієнта осадження. Відомо лише, що швидкість потоку була достатньою для утримання краплі-колектора в зоні вимірювання. З огляду на це, розрахунки проводились при швидкості газу U_∞ , яка дорівнювала швидкості витання v_v краплі-колектора.

Наведені на рис. 4 результати свідчать про суттєву відмінність значень η , розрахованих за формулою (3), і даних [9]. В той самий час має місце задовільне узгодження експериментальних даних і результатів обчислень коефіцієнта осадження за формулою (4). Таким чином, цю формулу можна рекомендувати для практичних розрахунків.

Розглянемо використання цієї формули для розрахунків ступеня очистки газів E від частинок золи апаратами двох типів – порожнистим скрублером (СП), і скрублером Вентурі (СВ). Величину E будемо визначати за формулою

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{3\eta q L u_{ji}}{2du_i}\right), \quad (8)$$

яка, зазвичай, використовується для розрахунків ефективності очищення газів апаратами

такого типу [10]. Тут q – питома витрата води на зрошення; L – висота СП (довжина труби Вентурі); u_{ji} – відносна швидкість зіткнення краплі з частиною; u_i – швидкість краплі. Як свідчить аналіз результатів робіт [10–12], для визначення коефіцієнта осадження η найбільше використовується залежність (1). Тому для розрахунків ступеня очистки і порівняння отриманих результатів, крім (4), будемо використовувати і цю залежність.

Швидкість газу в апаратах типу СП, як правило, підтримується в межах $u_g = 0,6–1,5 \text{ м/с}$, а питома витрати води становлять $q = 0,5–6 \text{ л/м}^3$. Гідравлічний опір Δp цих апаратів не перевищує 250 Па. Ефективність вловлювання золених частинок розміром $\delta > 10 \text{ мкм}$ за даними [13] сягає значень $E \approx 99 \%$ і різко знижується (до 60 – 70 %) при $\delta < 5 \text{ мкм}$.

Більш ефективними є скрубери Вентурі. Згідно з [14] вони можуть працювати з ефективністю $E = 96–98 \%$ навіть при уловлюванні золи із середнім розміром частинок 1–3 мкм. Початкова концентрація пилу у газі може складати від 0,05 до 100 г/м³. Швидкість газу в горловині повинна підтримуватися в межах 30 – 150 м/с, а питома витрата води – у межах 0,25 – 1,5 л/м³.

Вихідні дані, вибрані з урахуванням цих технічних характеристик апаратів, наведено в табл. 2. В цій же таблиці наведено деякі результати розрахунків, виконаних при $\rho_p = 2000 \text{ кг/м}^3$.

Таблиця 2 – Вихiднi данi i результати розрахунку ефективностi очищення

Тип апарата	$L, \text{ м}$	$q, \text{ л/м}^3$	$u_g, \text{ м/с}$	$d_{32} \cdot 10^3, \text{ м}$	Re	$\delta \cdot 10^6, \text{ м}$	K	E, % при визначеннi за формулою	
								(1)	(4)
СП	2	1	0,6	0,5	86	3	0,58	89	67
						10	6,42	99,8	99,7
СВ	2	1	50	0,15	112	1	0,94	91	82,3
						10	93,3	99,6	99,5

Середнiй дiаметр крапель (дiаметр Заутера d_{32}), якi утворюються при розпилюваннi води у трубi Вентурi, визначали за формулою Нукiями i Танасави з урахуванням поправок до неї, отриманих в роботi [15]. Значення u_i обчислювалися за результатами числових розрахункiв швидкостi краплi у трубi Вентурi i подальшого їх осереднення. Величина u_{ij} знаходилась за умови, що частинки золи рухаються зi швидкiстю газу.

Дiаметр d_{32} для апаратiв типу СП вибирався за даними [13] для вiдцентрових форсунок. Швидкiсть крапель приймалась рiвною їх швидкостi витання, а вiдносна швидкiсть u_{ij} знаходилась для умов протитечiйного руху газу з частинками золи i крапель.

Анализ результатiв, наведених в табл. 2, свiдчить про те, що при вибраних вихiдних даних лише для частинок $\delta \geq 10$ мкм величина E в обох типах апаратiв не залежить вiд того, за якими формулами визначався коефiцiєнт осадження η . Для менших частинок iснує певне значення розмiру δ , починаючи з якого величина E суттєво залежить вiд способу обчислення η .

Особливо велика вiдмiннiсть мiж значеннями ефективностi уловлювання дрiбних частинок, розрахованими з використанням (1) та (4), має місце для скрубера СП. Наприклад, за даними табл. 2, в разi використання формули (1) ефективнiсть уловлювання частинок $\delta = 3$ мкм порожнистим скрубером становить 89 %, а пiд час обчислення η за формулою (4) – E = 67 %. Зазначимо, що останнє значення ефективностi згiдно з [10, 13] бiльше вiдповiдає практицi експлуатацiї апаратiв цього типу.

Важливою характеристикою очисного апарата будь-якого типу є дiаметр частинок, якi уловлюються апаратом з ефективнiстю E = 50 %. За цiєю характеристикою можна порiвнювати апарати, або визначати конструктивнi i технологiчнi параметри процесу очищення, якi забезпечують для даної частинки значення η_{50} .

Нами виконано розрахунки геометричних характеристик (висоти порожнистого скрубера i довжини труби Вентурi), за яких для частинок з розмiрами, наведеними в табл. 2, досягаються значення E_{50} . Цi характеристики позначалися як L_{50} . Як i в попередньому випадку, коефiцiєнт осадження E_{50} визначався за формулами (1) (варiант А) i (4) (варiант Б).

Отриманi результати свiдчать про те, що у разi використання формули (1) величини L_{50} для обох типiв апаратiв меншi порiвняно з цiєю геометричною характеристикою, розрахованою з використанням залежностi (4). Наприклад, 50 % частинок дiаметром $\delta = 3$ мкм уловлюються порожнистим скрубером у варiантi А при значеннi $L_{50} = 0,61$ м, а у варiантi Б – при $L_{50} = 1,27$ м. Для забезпечення значень E_{50} при уловлюваннi частинок $\delta = 1$ мкм труба Вентурi у варiантах А i Б повинна мати довжину $L_{50} = 0,42$ м i $L_{50} = 0,56$ м вiдповiдно. З огляду на наведенi в табл. 2 i лiтературi [10, 13] показники ефективностi апаратiв СП i СВ значення L_{50} , отриманi у варiантi Б, точнiшi.

Таким чином, використання формули (4) для визначення коефiцiєнта осадження η i подальших розрахункiв ефективностi уловлювання частинок, з нашої точки зору, дає реальнiшi значення E, якi бiльше наближенi до практикi експлуатацiї апаратiв мокрого очищення газiв.

ВИСНОВКИ

Для прогнозування ефективностi очищення димових газiв апаратами мокрої очистки необхідна iнформацiя про коефiцiєнти осадження частинок на краплях рiдини (сферичних колекторах). Пiдведення частинок до поверхнi колекторiв при мокрому очищеннi газiв зумовлюється, в основному, iнерцiйним механiзмом.

Отримано залежнiсть для обчислення коефiцiєнта iнерцiйного осадження частинок на

сферичному колекторі при режимі його обтікання, проміжному між в'язким і потенціальним. Зіставлення результатів розрахунків цього коефіцієнта з відомими даними дозволяє рекомендувати отриману формулу для практичного використання.

Визначення за її допомогою коефіцієнта осадження при прогнозуванні ефективності мокрого очищення газів надає можливість аналізувати вплив режимних і технологічних параметрів очисних апаратів на процес очищення, і вибирати оптимальні режими їх експлуатації.

Робота підтримана НАН України (спільний проект № 07-08-12 (У) НАН України та Російського фонду фундаментальних досліджень.

1. *Langmuir I.* The production of rain by a chain reaction in cumulus clouds at temperatures above freezing / I. Langmuir // *J Meteor.* – 1948. – Vol. 5, No. 5. – P. 175 – 192.
2. *Фукус Н.А.* Механика аэрозолей / Н. А. Фукус. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 351 с.
3. *Fonda A.* The classical computation of the aerodynamic capture of particle by spheres / A. Fonda, H. Herne // *Int. J. Air Pollut.* – 1960. – Vol. 3, No. 1. – P. 26 – 34.
4. *Beard K.V.* Numerical collision efficiencies for small raindrops colliding with micron size particles / K. V. Beard, S. N. Grover // *J. Atmos. Sci.* – 1974. – Vol. 31, No. 2. – P. 543 – 550.
5. *Prem A.* Calculated particle collection efficiencies by single droplets considering inertial impaction, Brownian diffusion and electrostatics / A. Prem, M. J. Pilat // *Atm. Envir.* – 1978. – Vol. 12, No 10. – P. 1981 – 1990.
6. *Евстигнеев В.В.* Моделирование процессов очистки отработавших газов химических производств и дизельных агрегатов от твердых частиц СВС-фильтрами / В.В. Евстигнеев, А.Л. Новоселов, В.И. Пролубников, Н.П. Тубалов // *Изв.*

Томск. политехн. ун-та. – 2005. – Т. 308, № 1. – С. 138 – 143.

7. *Lim K.S.* Prediction for particle removal efficiency of a reverse jet scrubber / K.S. Lim, S.H. Lee, H.S. Park // *J. Aerosol Sci.* – 2006. – Vol. 37, No. 12. – P. 1826 – 1839.
8. *LeClair B.P.* A numerical study of the drag on a sphere at low and intermediate Reynolds numbers / B.P. LeClair, A.E. Hamielec, H.R. Pruppacher // *J. Atmos. Sci.* – 1970. – Vol. 27, No. 2. – P. 308 – 315.
9. *Collision* efficiencies empirically determined from laboratory investigations of collisional growth of small raindrops in a laminar flow field / O. Vohl, S.K. Mitra, S. Wurzler [et al.] // *Atm. Res.* – 2007. – Vol. 85, No. 11. – P. 120–125.
10. *Очистка* промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
11. *Сугак Е.В.* Очистка газовых выбросов от высокодисперсных частиц в дисперсно-кольцевом потоке / Е.В. Сугак, Н.А. Войнов, Н.Ю. Житкова // *Химия растительного сырья.* – 2000. – №4. – С. 85–101.
12. *Particle* removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception, and impaction / H. T. Kim, C. H. Jung, S. N. Oh, K. W. Lee // *Environmental Eng. Sci.* – 2001. – Vol. 18, No. 2. – P. 125 – 136.
13. *Алиев Г.М.-А.* Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справ. изд. / Г.М.-А. Алиев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
14. *Очистка* промышленных газов от газообразных и дисперсных примесей / Е.В. Сугак, Н.А. Войнов, Р.А. Степень, Н.Ю. Житкова // *Химия растительного сырья.* – 1998. – №3. – С. 21 – 34.
15. *Guerra V.G.* Experimental investigation on the effect of liquid injection by multiple orifices in the formation of droplets in a Venturi scrubber / V. G. Guerra, J. A. S. Goncalves, J. R. Coury // *J. Hazard. Mater.* – 2009. – Vol. 161. – P. 351 – 359.

Надійшла до редакції 28.03.2012