

ВПЛИВ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ЩІЛЬНОСТІ ЗРОШУВАННЯ У ПОРОЖНИСТОМУ СКРУБЕРІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОЧИСТКИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВІД ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК

На основі створеної раніше математичної моделі трифазового полідисперсного потоку запропоновано метод порівняння варіантів розподілу щільності зрошування по площі горизонтального перетину порожнистого скрубера та визначення його впливу на ефективність очистки газу від твердих частинок. Проведені числові дослідження свідчать про те, що зменшення нерівномірності розподілу щільності зрошування при певних умовах дозволяє майже втричі знизити викиди частинок в атмосферу.

К л ю ч о в і с л о в а: щільність зрошування, скрубери, трифазовий потік, краплі, тверді частинки, очистка газів від золи, ефективність.

Зола українського енергетичного вугілля містить такі шкідливі речовини, як важкі метали (барій, мідь, нікель, марганець), різноманітні токсичні елементи (миш'як, ванадій, ртуть, хлор) і радіонукліди (уран ^{235}U і ^{238}U , торій ^{232}Th , калій ^{40}K та ін.). При спалюванні вугілля за рахунок вигорання його органічної маси концентрація вказаних елементів у золі і шлаках значно підвищується у порівнянні з вихідним паливом. Тому покращення показників операції очистки відпрацьованих димових газів пилувугільних котлів від частинок легкої золи є важливою екологічною задачею. Її актуальність буде тільки зростати з переходом на європейські екологічні стандарти.

Значне поширення в енергетиці знайшли апарати для мокрої очистки димових газів, але вони, як правило, не відповідають сучасним вимогам — ступінь уловлювання частинок золи η не перевищує 95–97 %, що значно нижче існуючих норм (99 % і більше). Разом з тим можливості покращення їх роботи ще далеко не вичерпані. Для розв'язання цієї задачі, мабуть, найбільш раціональний шлях пов'язаний із побудовою адекватної математичної моделі робочого процесу в цих апаратах. Така модель для порожнистого скрубера була побудована в [1] в межах одновимірної постановки задачі. Цей вибір обґрунтовувався такими міркуваннями:

© О.А. ШРАЙБЕР, І.В. АНТОНЕЦЬ, 2015

— повна система основних рівнянь трифазового полідисперсного потоку газ–краплі–тверді частинки (ТЧ) містить рівняння зміни маси частинок, збереження твердої речовини і рідини, імпульсу та енергії для кожної з фракцій, а також параметрів газової фази (її складу, швидкості і температури);

— при виведенні цих рівнянь навіть на базі найпростішого, неперервного підходу Ленгмюра необхідно враховувати аеродинамічну і теплову взаємодію газ–частинки, фазові переходи та взаємодію усіх фракцій обох полідисперсних ансамблів, що приводить у загальному випадку до коагуляції і подрібнення з народженням полідисперсних осколків (тобто і в одновимірній постановці задача досить складна і громіздка);

— перехід до двовимірної постановки задачі буде вимагати формулювання значної кількості додаткових граничних умов, які можна обчислити лише дуже приблизно, і тому, ймовірно, цей перехід не приведе до підвищення точності розрахунку.

Для реалізації моделі [1] було розроблено ітераційний алгоритм інтегрування вказаних рівнянь і відповідну програму GLS5 [2]. Розрахунок складається з кількох ітерацій, кожна з яких включає два етапи: 1) інтегрування рівнянь для крапель (вниз); 2) інтегрування рівнянь для газу і ТЧ (знизу вгору). На етапі 1 кожної ітерації (крім першої) використовуються результати етапу 2 попередньої, а на етапі 2 —

параметри крапель, обчислені на етапі 1 «своєї» ітерації.

Необхідно підкреслити, що одновимірна постановка задачі не дозволяє враховувати одну істотну особливість розпилювання рідини промисловими (найчастіше відцентровими) форсунками – нерівномірність розподілу щільності зрошування по поперечному (горизонтальному) перетину апарата (вважається, що розподіл рівномірний). Тому розробка методу врахування цієї особливості становить значний практичний інтерес. Для двофазового полідисперсного потоку газ–краплі такий метод було розроблено стосовно до робочого процесу у краплинних градирнях [3]. Мета цієї роботи полягає в узагальненні даного методу на випадок розрахунку мокрої очистки газів від ТЧ.

Метод [3] базується на результатах широких експериментальних досліджень розподілу води, що розбризкується одиничними відцентровими форсунками або їх блоками (парами форсунок із факелами розпилу, спрямованими назустріч один одному), по горизонтальній площині, проведених свого часу в Інституті загальної енергетики НАН України [4]. Було встановлено, що на всіх режимах безпосередньо під форсунками утворюються мертві зони, практично вільні від крапель, а зона зрошування має форму кільця.

Для подальшого орієнтуємось на ту саму типову серію експериментів [4] по розподілу щільності зрошування, що використовується в [3]. Тут вся зона зрошування розділяється на три кільцеві області однакової ширини (позначаємо їх b, c, d , а мертву зону – a) так, що їх зовнішні радіуси становлять $R_a = 0,75$ м; $R_b = 1,833$ м; $R_c = 2,917$ м; $R_d = 4,0$ м. Площі цих областей дорівнюють $F_b \approx 2,8\pi$; $F_c \approx 5,15\pi$; $F_d \approx 7,5\pi$ м², а їх частки від площі усїєї зони зрошування становлять $\omega_b = 0,181$; $\omega_c = 0,333$; $\omega_d = 0,486$. У

дослідах [4] було встановлено такий $\chi_b = 0,133$; $\chi_c = 0,611$; $\chi_d = 0,256$. Тоді умовні щільності зрошування (без урахування множника π) дорівнюють $\varphi_k = \chi_k/F_k$ ($k = b, c, d$); $\varphi_b = 0,0475$; $\varphi_c = 0,119$; $\varphi_d = 0,0342$ м⁻². Середнє по площі усїєї зони зрошування значення цього параметра становить $\varphi_m = 1/(F_b + F_c + F_d) = 0,0649$ м⁻², і, нарешті, нормовані щільності зрошування – $\psi_b = \varphi_b/\varphi_m = 0,733$; $\psi_c = 1,838$; $\psi_d = 0,528$. Слід зазначити, що знайдені величини задовольняють умови $\omega_k \psi_k = \chi_k$ ($k = b, c, d$), що є свідченням коректності цих розрахунків. Видно, що області b і d бідні на воду, а область c – багата [3].

На першому етапі числових досліджень було розглянуто два варіанти розподілу крапель: ідеально рівномірний розподіл (варіант А) та істотно нерівномірний, де зона зрошування від одиничної форсунки чи блока, описана вище, ототожнюється з усїєю площею горизонтального перетину скрубера (варіант Б).

Для варіанта А було вибрано такі вихідні дані: початкова температура крапель – $t_{i0} = 20$ °С, газу і ТЧ – $t_{gf} = T_{jf} = 120$ °С; початкова швидкість крапель – $u_{i0} = 5$ м/с, газу і ТЧ – $u_{gf} = U_{jf} = -0,7$ м/с (координата x направлена вниз; величини з індексом g відносяться до газу, а 0 і f – до верхнього і нижнього перетинів апарата). Розміри частинок і їх початкові питомі масові витрати наведено в табл. 1.

Цей варіант дає ефективність очистки $\eta_A = 98,76$ %.

Для розрахунку варіанта Б слід розробити алгоритм коректування «рівномірних» значень g_{i0} (наведених у табл. 1) та швидкості газу u_{gf} для кожної області k . У загальному випадку тут треба врахувати чотири умови: 1) збереження загальної витрати крапель; 2) те саме для ТЧ; 3) те саме для газу; 4) однаковість перепадів тиску по областях Δp_k . У задачі [3] витрата кра-

Таблиця 1 – Вихідні дані для варіанта А

Величина	Розмірність	Номер фракції i (j)				
		1	2	3	4	5
δ_{i0}	мм	0,4	0,64	1,0	1,6	2,5
g_{i0}	кг/(м ² ·с)	0,075	0,1	0,15	0,1	0,075
Δ_{j0}	мкм	5	10	20	30	40
G_{j0}	кг/(м ² ·с)	0,004	0,006	0,01	0,006	0,004

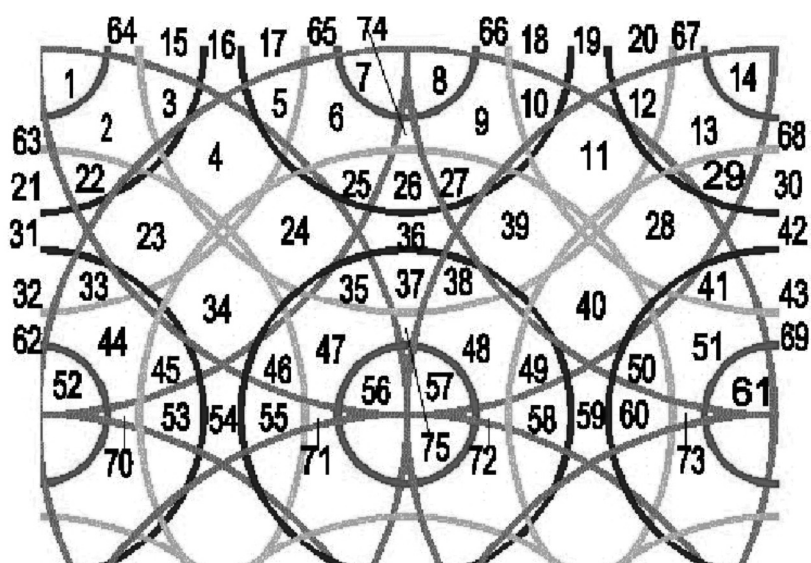
пель задається через масові концентрації фракцій μ_i , і розраховується теплообмін між краплями та газом. Тому в [3] реалізується досить складний алгоритм коректування, що задовольняє умови 3 і 4 (вплив витрати крапель тут порівняно незначний). У той самий час у нашій задачі газовий потік не відіграє важливу роль, залежність ступеня очистки від витрати твердих частинок дуже слабка, і замість μ_i використовуються питомі витрати g_i . Тому було запропоновано такий алгоритм, що орієнтується на умови 1 та 4. Згідно з першою g_{i0} для області k необхідно помножити на ψ_k . Далі, найбільш природно вважати, що перепад тиску приблизно пропорційний $\rho_k u_{rk}^2$, де ρ – розподілена густина крапель; u_r – швидкість ковзання газ–краплі. Як показали проведені розрахунки [1, 2], u_r слабо залежить від швидкості газу, а швидкість крапель зростає зі зменшенням u_g . Тоді $\Delta p_k \sim (g_k/u_k) u_{rk}^2 \sim g_k/u_k \sim g_k u_{gk}$, і u_{gf} помножується на ψ_k^{-1} . Можливий і більш простий підхід: $\Delta p_k \sim g_k u_{gk}^2$, і тоді за умовою 4 u_{gf} слід помножити на $\psi_k^{-1/2}$. Розрахунки показали, що обидва підходи приводять до близьких результатів, і далі використовується другий.

Для трьох областей у варіанті Б отримано такі результати: $\eta_b = 96,43\%$; $\eta_c = 99,94\%$; $\eta_d = 90,94\%$. Вважаємо, що концентрації ТЧ у зонах $b - d$ однакові. Тоді, оскільки витрата ТЧ для кожної області пропорційна її площі та швидкості газу, то ступінь очистки для всього апарата буде

$$\eta_B = \left(\sum_k \omega_k \psi_k^{-1/2} \right)^{-1} \sum_k \omega_k \psi_k^{-1/2} \eta_k = 93,93\% \quad (1)$$

Необхідно відзначити, що цей результат дещо завищений, оскільки наявність мертвих зон як поблизу осі форсунки, так і між площами зрошування сусідніх форсунок не враховується (врахувати цей фактор дуже складно). Як випливає із (1), нерівномірний розподіл щільності зрошування збільшує кількість частинок, що скидаються в атмосферу, у п'ять разів.

Далі розглянемо можливості організації більш рівномірного розподілу щільності зрошування. Подібно до [3] розраховуємо схему коридорного розташування однакових форсунок, при цьому відстань між осями сусідніх форсунок тут дорівнює $D = R_d$ (варіант В), і зовнішня межа зони зрошування кожної проходить через осі чотирьох сусідніх (див. рисунок, де зображено зовнішні межі мертвої зони a та областей $b - d$). Для верхньої половини квадрата $2R_d \times R_d$ на рисунку виділяємо 75 площадок (нехтуючи малими), які відповідно до формули зрошування розділяються на 7 регіонів (див. табл. 2, де наведено значення частки площі кожного регіону ω_k і нормованої щільності ψ_k ; більш детально їх обчислення викладено в [3]). У правому стовпчику табл. 2 наведено значення локального ступеня очистки η_k . Ефективність



До розрахунку площ регіонів 1–7 (варіант В)

Таблиця 2 – Вихідні дані для варіанта В та ступінь очистки

Номер регіону k	Номер площадок	Формула зрошування	ω_k	Ψ_k	$\eta_k, \%$
1	1, 7, 8, 14, 52, 56, 57, 61	$a + 2d$	0,1049	0,3499	78,94
2	2, 6, 9, 13, 44, 47, 48, 51	$b + 2d$	0,2395	0,5928	93,16
3	3, 5, 10, 12, 22, 25, 27, 29, 33, 35, 38, 41, 45, 46, 49, 50	$b + c + d$	0,1818	1,0266	98,88
4	4, 11, 23, 24, 28, 34, 39, 40	$2c + 2d$	0,3077	1,5673	99,84
5	16, 19, 31, 36, 42, 54, 59	$2c$	0,0507	1,2174	99,44
6	15, 17, 18, 20, 21, 26, 30, 32, 37, 43, 53, 55, 58, 60	$b + c$	0,0979	0,8517	97,72
7	62 – 73, 74, 75	$b + d$	0,0175	0,4179	84,47

Таблиця 3 – Вихідні дані для варіанта Г та ступінь очистки

Номер регіону k	Формула зрошування	ω_k	Ψ_k	$\eta_k, \%$
1	$b + 3c + 3d$	0,1336	1,3525	99,65
2	$b + 3c + 4d$	0,0468	1,4437	99,75
3	$b + 3c + d$	0,0869	1,17	99,32
4	$3c + 3d$	0,1637	1,2258	99,46
5	$c + 5d$	0,0568	0,7735	97,02
6	$b + 2c + d$	0,0694	0,8527	97,82
7	$b + 2c$	0,0156	0,7615	96,86
8	$b + c + 4d$	0,0668	0,8089	97,42
9	$2b + 4d$	0,1258	0,6182	94,0
10	$4c$	0,033	1,2695	99,53
11	$b + 3c$	0,098	1,0788	99,08
12	$b + 2c + 3d$	0,0367	1,0351	98,91
13	$b + 2c + 2d$	0,0668	0,9434	98,47

схеми в цілому обчислюється подібно до (1): $\eta_B = 93,8\%$.

На перший погляд, цей результат здається парадоксальним – більш рівномірний розподіл щільності зрошування, ніж у варіанті Б, призводить до дещо гіршої очистки. Але це можна пояснити істотно нелінійним характером залежності ступеня очистки від витрати крапель (тобто ψ_k): при малих ψ_k ця залежність дуже сильна, в той час як при великих ψ_k вона майже вироджується (див. табл. 2). Тому у варіанті В області 1 та 7 із дуже низькими витратами води сильно зменшують значення загального ступеня очистки.

Нарешті, в останньому варіанті (Г) форсунок розташовані дещо ближче одна до одної – $D = 0,75R_d$. Тут побудова формул зрошування і відповідних 13 регіонів, а також обчислення ω_k та ψ_k здійснюються таким же чином, як і у варіанті В (див. табл. 3).

Як і раніше, в останньому стовпчику наведено локальні ступені очистки. Обчислення загальної ефективності очистки дає $\eta_G = 98,01\%$. Отже, цей варіант дозволяє знизити втричі кількість леткої золи, яка викидається в атмосферу, що має важливе екологічне значення. Розроблений метод порівняння варіантів розподілу щільності зрошування у скрубєрі можна розглядати як інструмент для пошуку шляхів удосконалення та оптимізації процесу очистки димових газів від леткої золи.

ВИСНОВКИ

На основі створеної раніше математичної моделі трифазового полідисперсного потоку газ–краплі–тверді частинки розроблено метод порівняння варіантів розподілу щільності зрошування по площі горизонтального перетину скрубєра та визначення його впливу на ступінь очистки газу від твердих частинок. Проаналізовано чотири варіанти розподілу: ідеально рівномірний, істотно нерівномірний

та два розподіли із накладанням зон зрошування сусідніх форсунок одна на одну. Кращий із цих розподілів дозволяє знизити втричі кількість твердих частинок, які викидаються в атмосферу. Розроблений метод відкриває можливості пошуку шляхів удосконалення та оптимізації процесу очистки димових газів від частинок золи.

1. Шрайбер О.А. Моделювання процесу мокрої очистки димових газів від леткої золи / О.А. Шрайбер, І.В. Федінчик // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 86 – 92.
2. Федінчик І.В. Вплив режимних параметрів на ефективність мокрої очистки димових газів від частинок золи / І.В. Федінчик // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – Вип. 1 (32). – С. 50 – 54.
3. Вплив нерівномірності розподілу щільності зрошування на охолодження циркуляційної води у краплинній градирні / О.А. Шрайбер, В.В. Дубровський, О.М. Підвисоцький, В.Б. Редькін // Проблеми загальної енергетики. – 2012. – Вип. 1 (28). – С. 42 – 47.
4. Розвиток теорії тепломасообміну в гетерогенних середовищах та розробка методів оптимізації енергетичних технологій із двофазовим робочим тілом / О.А. Шрайбер, В.В. Дубровський, О.М. Підвисоцький та ін. // Звіт ІЗЕ НАН України. – Київ, 2006. – 141 с. – № держ. реєстр. 0104U003263.

Надійшла до редколегії: 13.03.2015