

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 532.529

І.В. ФЕДІНЧИК

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

## ВПЛИВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ МОКРОЇ ОЧИСТКИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВІД ЧАСТИНОК ЗОЛИ

*За допомогою створеної раніше програми проведено числові дослідження еволюції стану полідисперсного трифазового середовища стосовно до процесу мокрої очистки димових газів від золи у порожнистому скрубери. Вивчено залежність ефективності очистки від витрати крапель та початкових швидкостей фаз.*

*Ключові слова:* трифазовий потік, краплі, тверді частинки, ітераційний алгоритм, очистка газів від золи, ефективність.

Під час спалювання вугілля за рахунок вигорання його органічної маси концентрація важких металів (свинець, кобальт, цинк, мідь, нікель), різноманітних токсичних речовин (ртуть, миш'як тощо) та радіоактивних ізотопів у золі і шлаках значно зростає порівняно з вихідним паливом. Тому розроблення методів підвищення ефективності очистки димових газів від легкої золи є актуальною екологічною задачею. Значне поширення в енергетиці знайшли апарати для мокрої очистки димових газів (скрубери), але їх ефективність часто не відповідає сучасним вимогам, у той час як можливості покращення їх роботи ще далеко не вичерпані.

Для розв'язання цієї задачі найбільш доцільний шлях, мабуть, пов'язаний із математичним моделюванням. На жаль, у нечисленних роботах, присвячених цьому питанню (див., наприклад, [1, 2]), використовується надто спрощений підхід (інтегральний), де не враховується зміна всіх величин, крім концентрації твердих частинок, уздовж потоку, тверді частинки (ТЧ) і краплі вважаються монодисперсними (на практиці вони завжди полідисперсні), надто наближено обчислюються швидкості частинок та ін.

Більш точним та інформативним є диференціальний підхід [3], де всі параметри трифазового середовища вважаються змінними, і про-

цес моделюється системою диференціальних рівнянь для цих параметрів. Таку модель для порожнистого скрубера було побудовано в [4]. Повна система рівнянь тут включає рівняння для маси (розміру), питомої масової витрати ( $g_p, G_j$ ), швидкості ( $u_p, U_j$ ) і температури ( $t_p, T_j$ ) крапель і ТЧ, масового вмісту «чужої» фази в частинках ( $b_p, B_j$ ), швидкості ( $u_g$ ) і температури ( $t_g$ ) газу, а також густини водяної пари в газі (тут малі літери відносяться до крапель, великі – до ТЧ;  $i, j$  – номер відповідної фракції).

Оскільки початкові умови для крапель задаються у верхньому перетині потоку  $x_0$ , а для газу і ТЧ – у нижньому  $x_p$ , було розроблено ітераційний алгоритм інтегрування вказаної системи. 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 першому етапі ітерації 1 якимось чином задаються параметри ТЧ і газу (наприклад, сталими по довжині потоку), та обчислені параметри крапель запам'ятовуються у кількох «стандартних» перетинах потоку (позначимо ці параметри через  $P_1$ ). На другому етапі інтегруються рівняння для газу і ТЧ з урахуванням масиву  $P_1$ , а отримані результати (позначимо їх через  $Q_1$ ) запам'ятовуються. Далі, на першому етапі ітерації 2 знов інтегруються рівняння для крапель, але вже з урахуванням  $Q_1$ , а результати ( $P_2$ ) запам'ятовуються і т. д. Описаний алгоритм реалізовано у програмі GLS5 [4].

© І.В. ФЕДІНЧИК, 2013

Метою цієї роботи є вивчення впливу параметрів трифазового полідисперсного потоку на ефективність очистки продуктів згорання від золи. Для базового варіанта розрахунку (далі – варіант 1) було вибрано такі вихідні дані:

- кількість фракцій крапель і ТЧ – по 5;
- початкова температура крапель –  $t_{i0} = 20^{\circ}\text{C}$ , газу і ТЧ –  $t_{gf} = T_{jf} = 120^{\circ}\text{C}$ ;
- початкова швидкість крапель –  $u_{i0} = 5$  м/с, газу і ТЧ –  $u_{gf} = U_{jf} = -0,7$  м/с (координата  $x$  направлена вниз).

Розміри частинок і їх початкові питомі масові витрати наведено в табл. 1 (фракційний склад крапель відповідає дослідним даним ІЗЕ НАН України по розпилюванню рідини відцентровими форсунками [5]).

На рис. 1 наведено залежність швидкості крапель різних фракцій від поздовжньої координати. Основними факторами, що визначають зміну швидкості крапель, є сили аеродинамічного опору і тяжіння, і тому кожна  $u_i$  прямує до величини  $v_i - u_g$ , де  $v_i$  – швидкість витання крапель  $i$ . При цьому довжина ділянки розгону зростає зі збільшенням діаметра крапель – від  $x_1 \sim 1$  м до  $x_4 \sim 3$  м. Зіткнення крапель дещо зменшують розкид швидкостей різних фракцій.

На рис. 2 проілюстровано температурне поле крапель різного діаметра. Якщо дрібні краплі встигають нагрітися на  $18,5^{\circ}\text{C}$ , то великі – усього на  $8,7^{\circ}\text{C}$ . Така поведінка кривих пояснюється тим, що тут домінують конвективний теплообмін із газом та фазовий перехід.

Таблиця 1 – Вихідні дані для варіанта 1

Величина	Розмірність	Номер фракції $i$ ( $j$ )				
		1	2	3	4	5
$\delta_i$	мм	0,4	0,64	1,0	1,6	2,5
$g_i$	кг/(м <sup>2</sup> с)	0,1	0,15	0,2	0,15	0,1
$\Delta_j$	мкм	5	10	20	30	40
$G_j$	кг/(м <sup>2</sup> с)	0,004	0,006	0,01	0,006	0,004

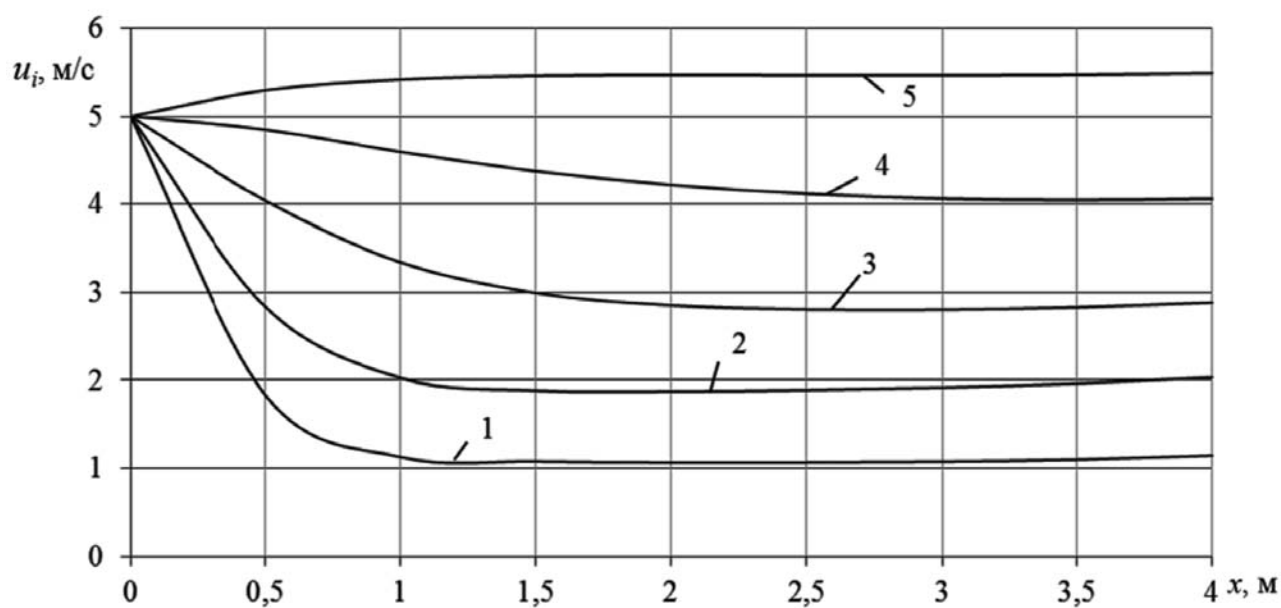


Рис. 1. Зміна швидкості крапель по довжині потоку (тут і далі номери кривих збігаються із номерами фракцій у табл. 1)

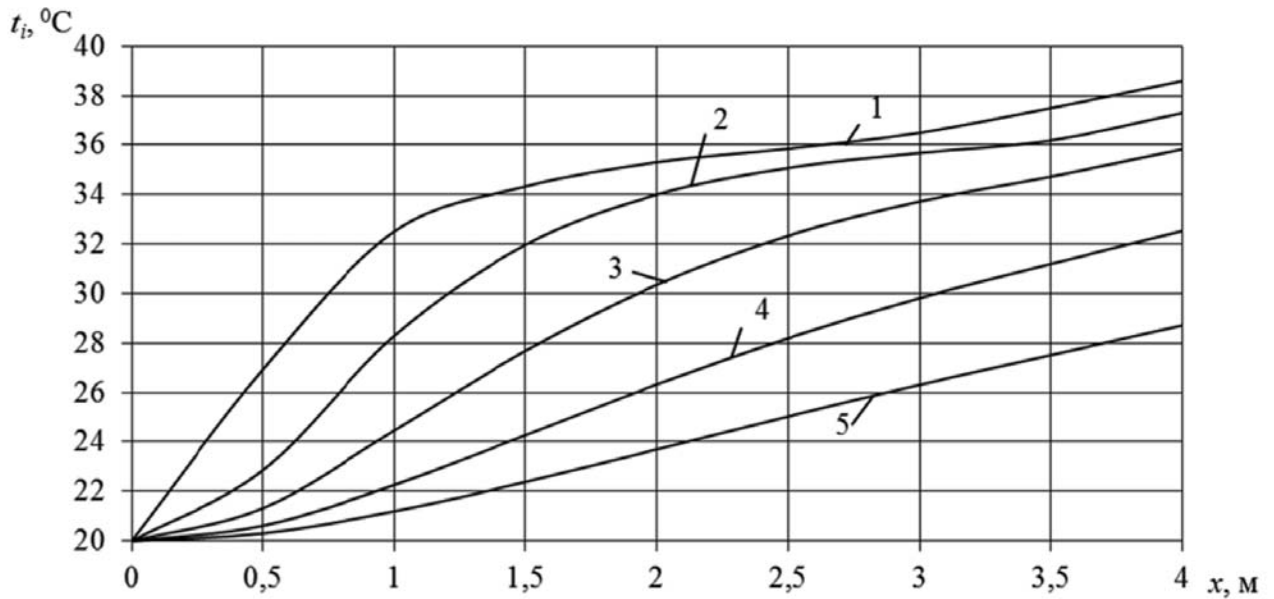


Рис. 2. Температурне поле крапель різного діаметра

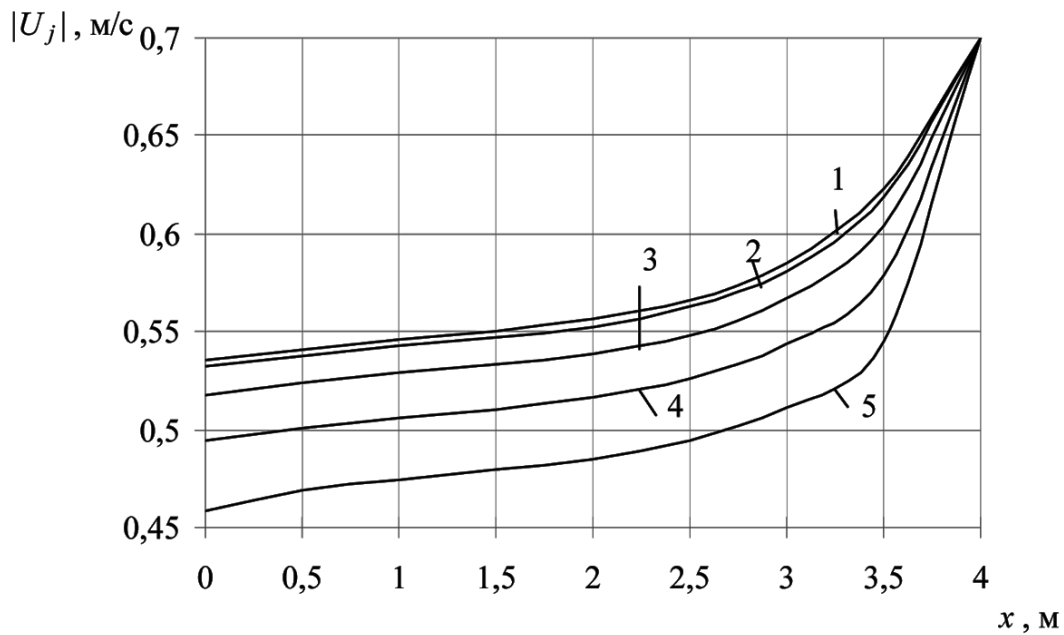


Рис. 3. Зміна швидкості ТЧ по довжині потоку

Рис. 3, 4 необхідно читати «справа наліво» – частинки входять у нижній перетин потоку ( $x_f = 4$  м), а виходять із верхнього ( $x_0 = 0$ ). На рис. 3 наведено криві швидкості ТЧ. Як і раніше (рис. 1), вони змінюються в основному за рахунок дії сил тяжіння та опору, і тому залежність  $U_j(\Delta_j)$  у кожному перетині монотонна.

На рис. 4 наведено характеристику уловлювання частинок краплями. Природно, що більш крупні частинки уловлюються краще:

якщо питома витрата першої фракції у вихідному перетині  $x_0 = 0$  дорівнює  $1,29 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>2</sup>·с, то для п'ятої ця величина зменшується до  $4,033 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·с, тобто майже у 3200 разів. Сумарна витрата всіх частинок після очистки становить  $1,33 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>2</sup>·с, і ефективність уловлювання тут становить  $\eta = 99,57$  %. Це досить хороший показник, але необхідно мати на увазі, що у цьому варіанті використовується досить велика кількість води –  $\Sigma g_{i0} = 0,7$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Тому цікаво з'ясувати, як змінюється ефектив-

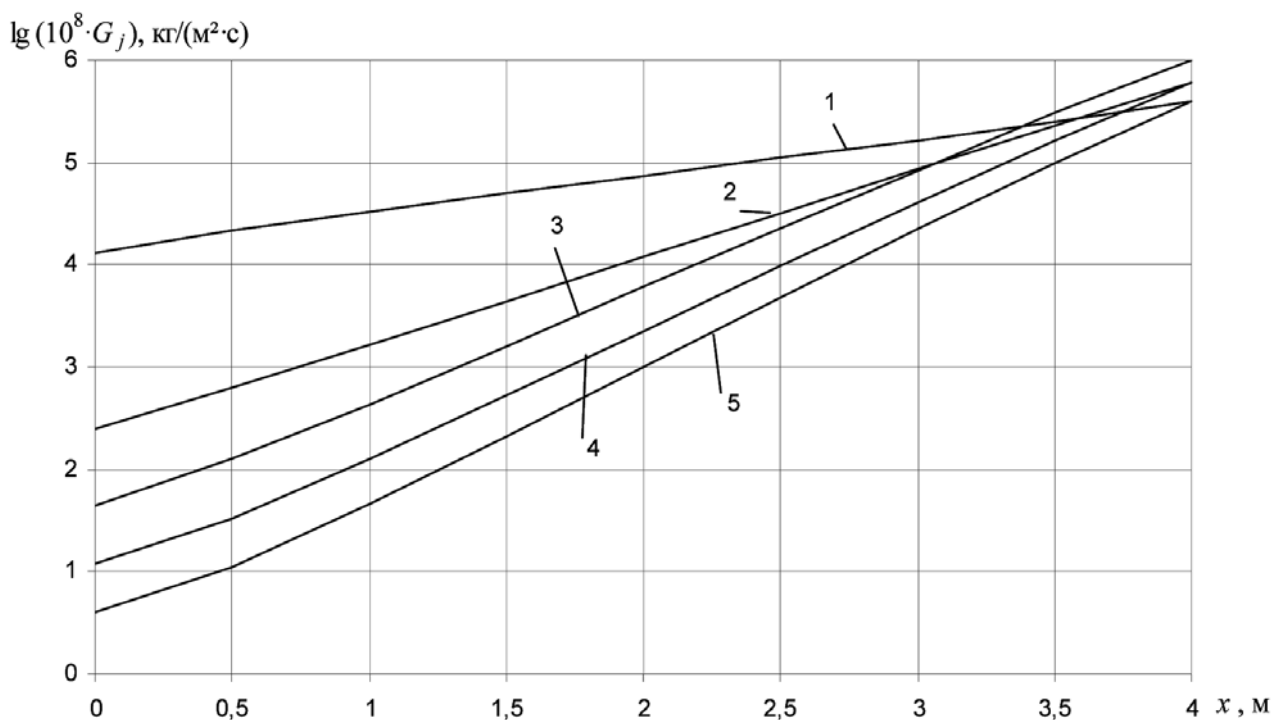


Рис. 4. Зміна концентрації твердих фракцій по довжині потоку

ність очистки зі зміною густини зрошування. У другій серії числових експериментів варіювались витрати фракцій крапель (кг/(м<sup>2</sup>·с), див. табл. 2).

Видно, що зі збільшенням витрати води ефективність очистки зростає, але немає сенсу витрачати надто велику кількість води, оскільки у варіанті 4 ефективність мало відрізняється від варіанта 1.

Третю серію було присвячено дослідженню впливу зміни швидкості газу  $u_g$  на закономірності переносу в потоці. Тут отримано такі результати:

$ u_g $ , м/с	0,5	0,7	1,0	1,3
$\eta$ , %	99,84	99,57	99,18	98,97.

Від швидкості газового потоку залежить час перебування твердих частинок в об'ємі апарата, отже, зі зниженням  $|u_g|$  зростає імовірність уловлювання твердих частинок краплями.

У четвертій серії було досліджено вплив початкової швидкості крапель:

$u_{i0}$ , м/с	2,0	3,5	5,0	6,5
$\eta$ , %	99,28	99,44	99,57	99,67.

Як видно, ефективність очистки покращується зі зростанням початкової швидкості крапель. Це пояснюється тим, що при значних  $u_{i0}$  на певній ділянці потоку швидкості ковзання  $|u_i - U_j|$  та інтенсивність взаємодії крапля – ТЧ більше.

## ВИСНОВКИ

Проведено числові дослідження зміни стану трифазового середовища стосовно до визначення ефективності очистки димових газів у порожнистому скрубєрі. Проаналізовано вплив зміни витрати води, початкових швидкостей крапель та газу на ефективність уловлювання

Таблиця 2 – Вихідні дані та ККД апарата для другої серії розрахунків

Номер варіанта	Номер фракції $i, j$					$\Sigma g_{i0}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$\eta$ , %
	1	2	3	4	5		
2	0,05	0,06	0,08	0,06	0,05	0,3	95,59
3	0,075	0,1	0,15	0,1	0,075	0,5	98,76
4	0,15	0,2	0,3	0,2	0,15	1,0	99,9

частинок золи. З'ясовано, що уловлювання покращується зі збільшенням густини зрошування та швидкості крапель, а також зі зменшенням швидкості газового потоку.

Ця робота виконана за фінансової підтримки НАН України (спільний проект № 07-0,8-12 (У) НАН України та Російського фонду фундаментальних досліджень).

1. *Lim K. S., Lee S. H., Park H. S.* Prediction for particle removal efficiency of a reverse jet scrubber // *Journal of Aerosol Science*. – 2006. – Vol. 37. – P. 1826–1839.
2. *Raj Mohan B., Jain R. K., Meikap B. C.* Comprehensive analysis for prediction in spray scrubber // *Separation and Purification Technology*. – 2008. – Vol. 63. – P. 269–277.
3. *Стернин Л. Е., Шрайбер А. А.* Многофазные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1994. – 320 с.
4. *Шрайбер О. А., Федінчик І. В.* Моделювання процесу мокрої очистки димових

газів від леткої золи // *Промышленная теплотехника*. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 86–92.

5. *Дубровский В. В., Подвысоцкий А. М., Баштовой А. И.* Повышение охладительной способности градирни за счет увеличения поверхности охлаждения при распыливании воды центробежными форсунками // *Проблеми загальної енергетики*. – 2006. – № 14. – С. 52 – 56.

*Надійшла до редколегії 05.04.2013*

*Рецензент*

*Зав.відділу оптимізації розвитку паливних баз ІЗЕ НАН України,*

*канд.техн.наук*

*О.В.Стогній*