

ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ МОКРОЇ ОЧИСТКИ ГАЗІВ У СКРУБЕРІ ВЕНТУРІ

За допомогою створеної раніше програми проведено числове дослідження аеродинаміки та теплообміну у полідисперсному трифазовому потоці стосовно до процесу мокрої очистки димових газів пиловугільних котлів від золи у скрубери Вентурі. Вивчено залежність ефективності очистки від витрати крапель, початкових швидкостей фаз, а також від перетину, в якому вводять краплі.

Ключові слова: трифазовий потік, краплі, тверді частинки, скрубери Вентурі, очистка газів від золи, ефективність.

Типова ТЕС потужністю 1000 МВт спалює за рік більше ніж 3 млн т вугілля і викидає в атмосферу, крім низки інших речовин, близько 30 тис. т золи. Летка зола українських вугільних ТЕС містить різноманітні токсичні елементи, важкі метали, радіоактивні ізотопи та ін., що призводить до довготривалого забруднення оточуючого середовища. Як правило, існуюче обладнання не дозволяє ефективно очищати димові гази, тому пошук можливостей його удосконалення та оптимізації є важливою задачею енергетичної науки України. Значне поширення в енергетиці знайшли апарати для мокрої очистки димових газів, серед яких найбільш ефективними вважаються скрубери Вентурі [1, 2]. Проте показники роботи таких апаратів часто не відповідають сучасним вимогам, у той час як можливості їх покращення ще далеко не вичерпані.

Очевидно, що раціональним шляхом удосконалення та оптимізації таких апаратів є побудова коректної математичної моделі. На жаль, у нечисленних роботах, присвячених цьому питанню (див., наприклад, [3, 4]), використовується надто спрощений підхід (його можна назвати інтегральним), де не враховується

зміна всіх параметрів трифазового середовища, крім концентрації твердих частинок, уздовж потоку, тверді частинки (ТЧ) і краплі вважаються монодисперсними (на практиці вони завжди полідисперсні), надто наближено обчислюються швидкості частинок, враховуються далеко не всі види їх взаємодії та ін.

Набагато більш точним та інформативним є диференціальний підхід [5], де враховується зміна всіх параметрів трифазового середовища уздовж потоку, і процес моделюється системою диференціальних рівнянь для цих параметрів. Таку модель для порожнистого скрубера було побудовано в [6] і узагальнено в [7] на випадок скрубера Вентурі. 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 відповідно, 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).

Модель враховує фазові переходи (випаровування рідини), взаємодію крапель i з краплями інших фракцій, коагуляцію крапель i з ТЧ усіх фракцій, налипання рідини на ТЧ, що не коагулюють при зіткненнях із краплями i , взає-

модію твердих частинок, аеродинамічний опір, народження осколків при всіх типах взаємодії, де краплі беруть участь, подрібнення великих крапель аеродинамічними силами, захоплення ТЧ та крапель турбулентними пульсаціями та вплив турбулентності газового потоку на частоту зіткнень.

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:

- радіус вхідного і вихідного перерізів труби Вентурі $R_0 = R_f = 0,75$ м;
- радіус її горловини $R_l = 0,375$ м;
- довжини конфузора, горловини і дифузора – 0,8, 0,25 та 3,95 м відповідно;
- кількість фракцій крапель – 7;
- кількість фракцій ТЧ – 5;
- початкова температура крапель – $t_{i0} = 20^\circ\text{C}$, газу і ТЧ – $t_{g0} = T_{j0} = 120^\circ\text{C}$;
- початкова швидкість крапель – $u_{i0} = 20$ м/с, швидкість газу на вході в горловину $u_{gt} = 60$ м/с; швидкості газу і ТЧ в перерізі R_0 однакові;
- краплі вводяться в переріз $x_s = 0,4$ м.

Розміри частинок і їх початкові питомі масові витрати наводяться в табл. 1. Необхідно відзначити, що початкова швидкість газу дещо менша за u_{gt} через зниження температури газу в конфузори, і тому розрахунок проводиться методом спроб і помилок. У даному варіанті три фракції крапель подрібнюються аеродинамічними силами у різних перетинах потоку, їх речовина перерозподіляється між іншими фракціями, і вводяться відповідні поправки до значень u_p , t_p , b_i .

На рис. 1 показано зміну швидкості газу та трьох фракцій по довжині потоку. Внаслідок істотної зміни швидкості газу та різної інерційності частинок різних фракцій криві їх швидкостей перетинаються, і у таких областях відносні швидкості (осередненого руху) незначні. Тут на перший план виходять турбулентні явища – зіткнення за рахунок пульсаційних швидкостей.

На рис. 2 наведено дані по зміні питомої витрати ТЧ. Тут необхідно мати на увазі, що величина G_j змінюється не тільки за рахунок уловлювання ТЧ, а і через зміну площі поперечного перерізу апарата (це пояснює зростання витрат ТЧ у конфузори). Видно, що концентрація найдрібніших частинок зменшилась лише приблизно у 4 рази, у той час як фракції 2–4 уловлюються практично повністю. Це пояснюється малими значеннями коефіцієнта осадження мікронних частинок.

Цікаво, що п'ята фракція ТЧ уловлюється значно гірше дрібніших частинок – тут основним чинником є параметр коагуляції Ψ_{ji} , який помітно знижується із зростанням Δ_j (див. [8]). Ефективність уловлювання становить $\eta = 96,94\%$, що слід вважати не досить хорошим результатом.

У другій серії розрахунків змінювались витрати фракцій крапель (кг/(м²·с), див. табл. 2). Видно, що зі збільшенням витрати води ефективність очистки помітно зростає. На рис. 3 наведено дані розрахунку варіанта 3, який показав найкращі результати із цієї серії. Характер ефективності уловлювання по фракціях аналогічний базовому варіанту, але кількість викидів ТЧ в атмосферу тут менше у 2,2 рази. Проте збільшення витрати води не економічно, і тому було проведено додаткові

Таблиця 1 – Вихідні дані для варіанта 1

Величина	Розмірність	Номер фракції i (j)						
		1	2	3	4	5	6	7
δ_{i0}	мм	0,08	0,15	0,26	0,37	0,6	1	2
g_{j0}	кг/(м ² ·с)	4	5	6	5	4	1,5	1,5
Δ_{j0}	мкм	1	2,5	5	10	20		
G_{j0}	кг/(м ² ·с)	0,12	0,18	0,3	0,18	0,12		

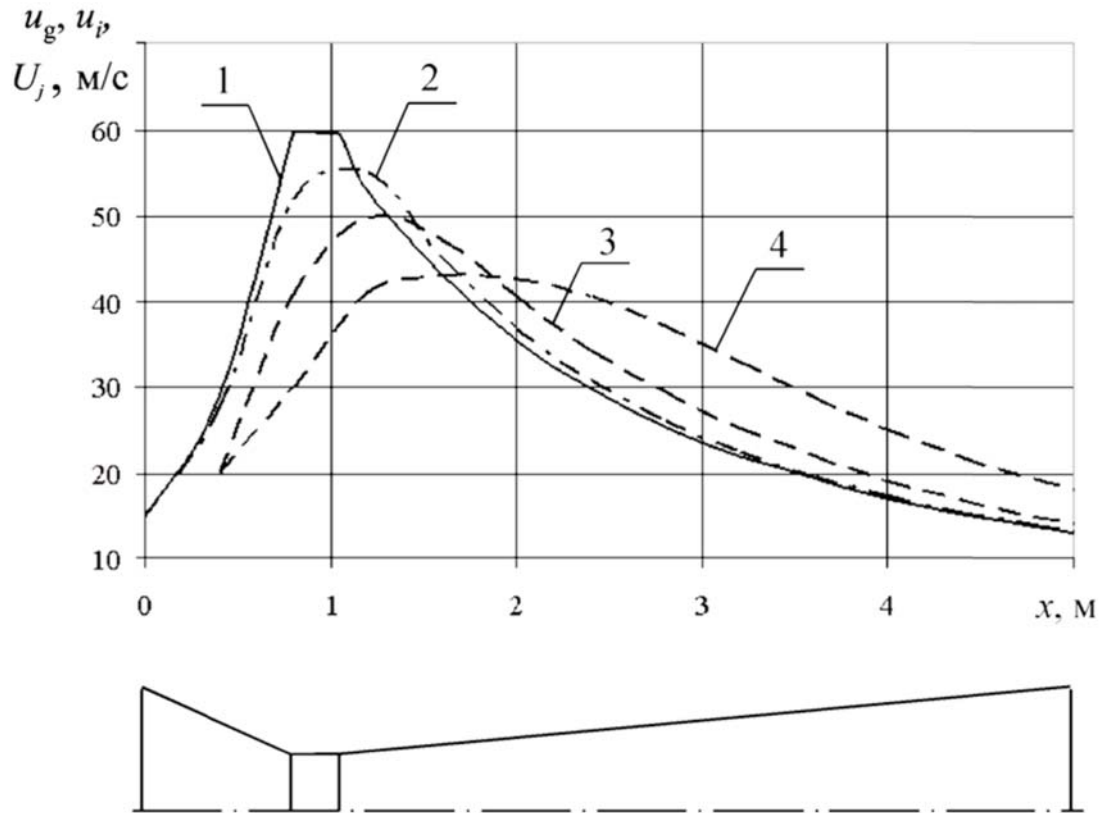


Рис. 1. Розподіл швидкостей по довжині потоку: 1 – швидкість газу; 2 – п’ятої фракції ТЧ; 3 – першої фракції капель; 4 – четвертої фракції крапель

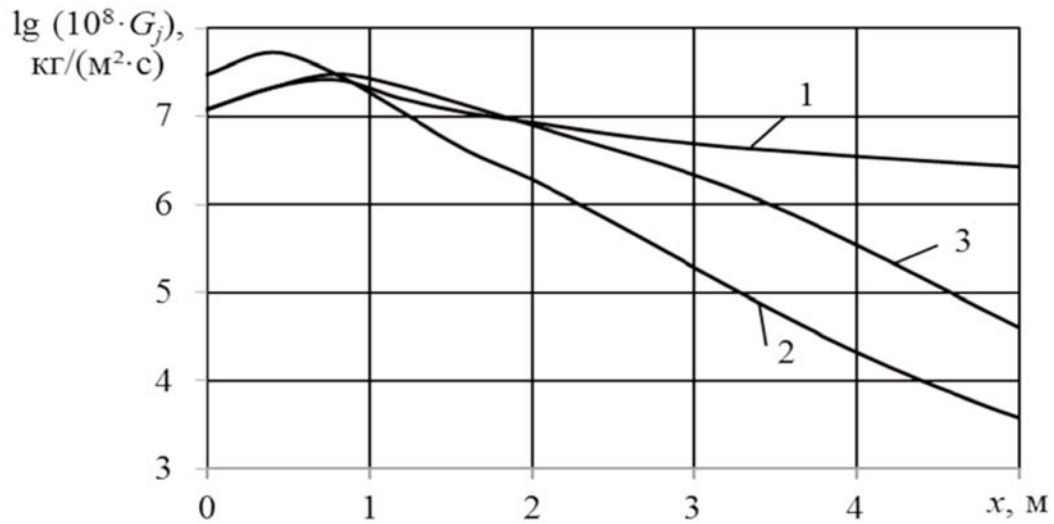


Рис. 2. Зміна витрати фракцій ТЧ для базового варіанта: 1 – $j=1$; 2 – $j=3$; 3 – $j=5$

Таблиця 2 – Вихідні дані, сумарна витрата твердих частинок на виході та ККД апарата для другої серії розрахунків

Номер варіанта	Номер фракції i							Σg_{i0} , кг/(м ² ·с)	ΣG_j , кг/(м ² ·с)	η , %
	1	2	3	4	5	6	7			
2	2	2,5	3	2,5	2	0,75	0,75	13,5	0,053	94,08
3	8	10	12	10	8	3	3	54	0,013	98,59
4	6	7,5	9	7,5	6	2,25	2,25	40,5	0,018	98,02

розрахунки при тому самому значенні Σg_{i0} , що і в базовому варіанті.

Третю серію було присвячено дослідженню впливу зміни швидкості газу u_{gt} на закономірності переносу в потоці. Тут отримано такі результати:

u_{gt} , м/с	30	40	60	80
η , %	87,10	90,73	96,94	98,58.

Зі збільшенням швидкості газу ефективність уловлення покращується, що пов'язано як зі зростанням осереднених швидкостей ковзання, так і зі збільшенням ступеня турбулентності потоку. На рис. 4 показано, як змінюється витрата окремих фракцій ТЧ уздовж потоку для найбільш ефективного варіанта цієї серії досліджень. Концентрація найдрібніших частинок тут зменшується у 13 разів, а фракцій 2, 3 і 4 –

на кілька порядків. Загалом у порівнянні із базовим варіантом кількість викидів ТЧ зменшується у 2,2 раза.

У четвертій серії було досліджено вплив початкової швидкості крапель, що привело до таких результатів:

u_{i0} , м/с	5	10	20	30
η , %	98,19	97,86	96,94	95,90.

Як видно, ефективність очистки погіршується зі зростанням початкової швидкості крапель. Якщо швидкість крапель зменшується у 4 рази, то кількість викидів в атмосферу знижується у 1,7 раза.

У п'ятій серії досліджень змінювався переріз введення крапель у скрублер:

x_s , м	0,2	0,3	0,4	0,7
η , %	97,22	97,11	96,94	94,96.

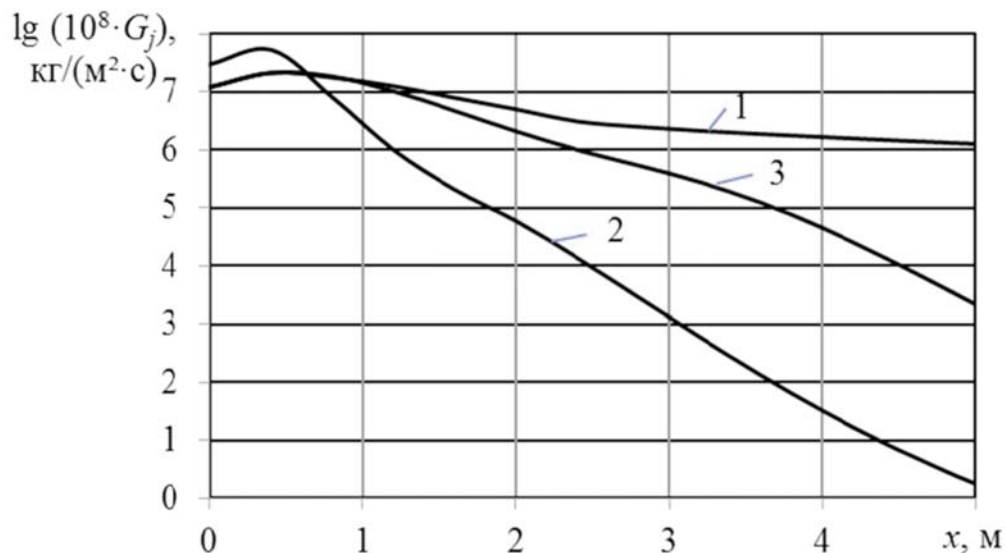


Рис. 3. Зміна витрати фракцій ТЧ для варіанта 3: 1 – $j=1$; 2 – $j=3$; 3 – $j=5$

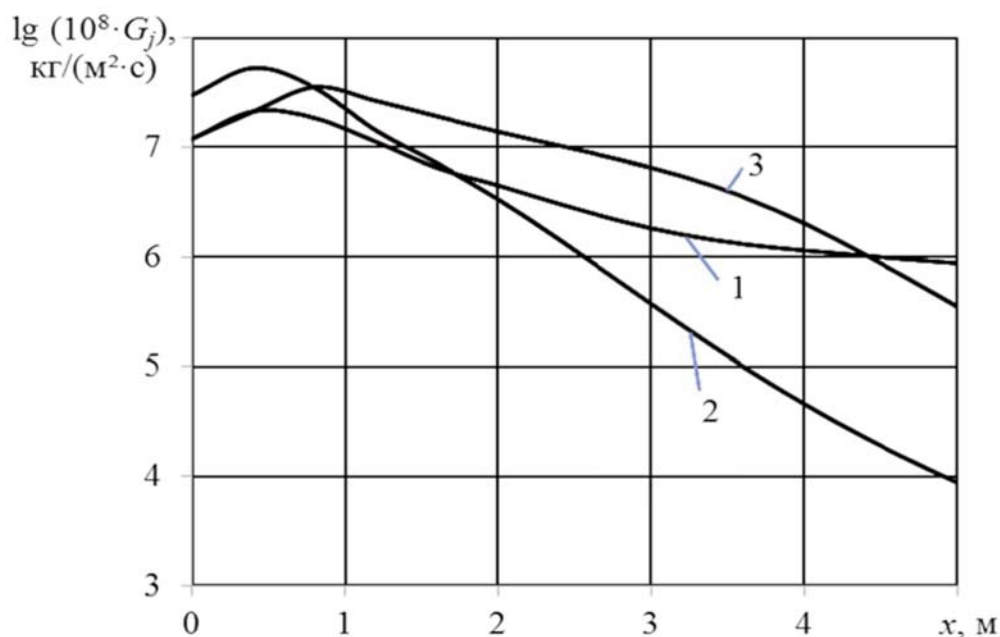


Рис. 4. Зміна витрати фракцій ТЧ при $u_{gt} = 80$ м/с: 1 – $j = 1$; 2 – $j = 3$; 3 – $j = 5$

При введенні крапель у скрубєр ближче до горловини ефективність очистки погіршується. При збільшенні відстані між перерізом введення крапель та горловиною вдвічі у порівнянні з базовим варіантом кількість викидів зменшується приблизно на 10%.

ВИСНОВКИ

За допомогою створеної раніше програми було проведено числові дослідження зміни стану трифазового середовища стосовно до процесу очистки димових газів у скрубєрі Вентурі. Виконано чотири серії досліджень та проаналізовано вплив зміни витрати води, початкових швидкостей крапель та газу, а також перетину введення крапель у скрубєр на ефективність уловлювання частинок золи. З'ясовано, що ефективність уловлювання найбільш помітно покращується зі збільшенням кількості води або швидкості газу. Зменшення початкової швидкості крапель та зміна перерізу їх подачі незначно впливають на ступінь очистки. В результаті найбільш ефективним способом покращення очистки є підвищення швидкості газу.

1. Кропп Л.И., Акбрут А.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. – М.: Энергия, 1977. – 160 с.
2. Палатник И.Б. Золоуловители с трубами-коагуляторами Вентури. – Алма-Ата: Наука, 1981. – 208 с.
3. 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.
4. 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.
5. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1994. – 320 с.
6. Шрайбер О.А., Федінчик І.В. Моделирование процесса мокрой очистки димовых газов від леткої золи // Пром. теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 86–92.
7. Шрайбер О.А. Моделирование очистки газів від твердых частинок у скрубєрі Вентурі // Пром. теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 3. – С. 87–93.

8. Підвисоцький О.М., Дубровський В.В., Шрайбер О.А. Узагальнення дослідних даних щодо ефективності уловлювання частинок золи краплями стосовно процесу мокрої очистки димових газів // Проблеми загальної енергетики. – 2012. – Вип. 2 (29). – С. 35–40.

Надійшла до редколегії 24.04.2014

Рецензент

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

О.В. Стогній