

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 532.529

О.А. ШРАЙБЕР, д-р техн. наук, проф., І.В. АНТОНЕЦЬ,
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03680, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ СКРУБЕРА ВЕНТУРІ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗІВ ВІД ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК

Встановлено, що оптимальні умови роботи скрубера Вентурі відповідають мінімально можливим координатам подачі крапель, їх швидкостям та модам функцій їх розподілу за розмірами, а також максимальним швидкостям газу в горловині. Наведено приклад знаходження оптимальної геометрії скрубера.

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

Серед апаратів для мокрої очистки газів від завислих частинок, що використовуються в енергетиці та промисловості, найбільш ефективними вважаються скрубери Вентурі, але показники їх роботи далеко не завжди відповідають існуючим вимогам. Для визначення шляхів удосконалення та оптимізації таких апаратів видається доцільним застосовувати метод математичного моделювання, зокрема, найбільш повну модель полідисперсного трифазового потоку, що була розроблена в Інституті загальної енергетики (ІЗЕ) НАН України [1, 2]. У моделі враховуються взаємодія крапель різних фракцій, зіткнення твердих частинок (ТЧ), взаємодія крапель із ТЧ, що може привести до їх коагуляції або відскоку частинки від краплі, подрібнення крапель аеродинамічними силами, вплив турбулентності на швидкість ковзання між частинками та ін. Результати використання такої моделі для порожнистого скрубера представлено в [3]. У цьому повідомленні знаходяться оптимальні умови роботи скрубера Вентурі.

© О.А. ШРАЙБЕР, І.В. АНТОНЕЦЬ, 2016

Ефективність роботи скрубера Вентурі визначається як

$$\eta = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^N G_{jf} (1 - B_{jf})}{\sum_{j=1}^N G_{j0}} \right] \cdot 100\%, \quad (1)$$

де G_j – питома масова витрата фракції j твердих частинок; B_j – масова концентрація рідини у ТЧ; N – кількість фракцій ТЧ; індекси 0 та f відносяться до вхідного та вихідного перетинів апарата.

У загальному випадку ефективність його роботи залежить від багатьох величин: фізичних властивостей твердої речовини, газу, рідини та її пари; початкових швидкостей і температур компонентів трифазового потоку;

сумарної витрати ТЧ на вході $\sum_j G_{j0}$ та їх фракційного складу Δ_{j0} (розмір ТЧ), G_{j0} ; подібних характеристик для крапель $\sum_{i=1}^M g_{i0}, \delta_{i0}, g_{i0}$ (M – кількість їх фракцій); геометричних характеристик апарата та координати x_{st} подачі

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунків

n	1	2	3	4	5
Фактори	b	c , 1/мм	x_{st} , м	u_{gt} , м/с	u_{i0} , м/с
Базова точка	1,9	1,6	0,4	60	20
Інтервали варіювання	0,05	0,1	0,05	2,5	1
Мінімальні значення	1,67	1,05	0	40	5
Максимальні значення	2,1	2,5	0,9	80	30

Таблиця 2 – Умови та результати першого етапу пошуку оптимального режиму

Номер досліду	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	q
1	1	1	1	1	1	3,326
2	-1	-1	-1	1	1	2,748
3	1	1	-1	-1	-1	4,259
4	1	-1	1	-1	-1	4,854
5	-1	1	-1	-1	1	4,678
6	-1	-1	1	1	-1	3,084

крапель у двофазовий потік (газ + ТЧ). Звичайно, дослідити вплив кожної із перелічених величин навряд чи можливо, але у цьому нема необхідності, оскільки деякі з них постійні або змінюються у дуже вузькому діапазоні (якщо рідиною є вода), і, крім того, ми не можемо міняти довільно характеристики димових газів та легкої золи, а також вихідні температури. Нарешті, ТЧ звичайно невеликі, і для спрощення вважаємо, що початкові температури і швидкості ТЧ та газу однакові.

Подібно до [3] розглядаємо функцію розподілу крапель за розмірами, встановлену свого часу в досліді ІЗЕ та характерну для широко поширених у промисловості відцентрових форсунок:

$$f(\delta) = A \delta^b \exp(-c\delta). \quad (2)$$

Розглядаємо «класичну» форму труби Вентурі, що складається із двох конусів (конфузора і дифузора) та циліндра (горловини). Як показали попередні дослідження, істотний вплив на ефективність очистки мають довжини

конфузора L_1 та горловини L_2 . В результаті приходимо до висновку, що характеристики процесу визначаються сімома параметрами: b , c , u_{gt} , u_{i0} , x_{st} , L_1 , L_2 (u_{gt} – швидкість газу на вході у горловину).

Щоб уникнути громіздких обчислень екстремальної точки у семивимірному факторному просторі, розіб'ємо нашу задачу на дві: у першій вибираємо реальну геометрію труби Вентурі, що застосовується на практиці [4, 5], і розглядаємо п'ятивимірний простір b , c , u_{gt} , u_{i0} , x_{st} , а у другій оптимізуємо геометричні характеристики. Для розв'язання першої задачі фіксуємо фізичні властивості речовин, їх початкові температури та початкові витрати крапель і твердих частинок.

Для вказаних вище п'яти змінних використовуємо їх кодові позначення z_n ($n = 1 - 5$). На основі рекомендацій [4, 6] та наших дослідних даних вибираємо параметри початкової (базової) точки, де $z_n = 0$, інтервали варіювання факторів Δz_n , які відповідають $\Delta z_n = 1$, та їх мінімальні і максимальні значення, що наведені в табл. 1.

На першому етапі пошуку будуємо локальне лінійне рівняння регресії для деякого околу базової точки. План, що було реалізовано для цього, та отримані результати наводяться у табл. 2 (тут $q = 100 - \eta$ (%), див. (1)).

Обробка даних табл. 2 дозволила отримати таке рівняння регресії:

$$q = 3,825 - 0,0562 z_1 + 0,0238 z_2 + 0,3213 z_3 - 0,9412 z_4 + 0,1533 z_5. \quad (3)$$

Видно, що найбільший вплив на величину q чинить швидкість газового потоку, і для покращення уловлювання частинок слід її збільшувати.

Далі, на другому етапі реалізується рух по факторному простору у напрямку, протилежному градієнту наближення (3). Як параметри базової точки вибираємо значення факторів, що відповідають досліді 2 із табл. 2, який дає кращий результат серед дослідів першого етапу. Для четвертого фактора вибираємо той

самий крок, що у табл. 2 ($\Delta z_4 = 1$, $\Delta u_{gt} = 2,5$ м/с), а кроки для інших – пропорційно коефіцієнтам регресії. Вихідні дані для розрахунків і отримані результати наведено в табл. 3.

Таким чином, процедура крутого спуску дозволила покращити характеристики роботи апарата більше ніж втричі у порівнянні з кращим дослідом у табл. 2 і привела нас на границю досліджуваної області – на гіперплощину $u_{gt} = 80$ м/с. Тому далі, на третьому етапі досліджуємо поведінку функції відклику у чотиривимірному факторному просторі поблизу точки, що відповідає кращому досліді 13 (позначимо її через A_1). Приписуємо їй значення кодових змінних $z_n = 0$ і реалізуємо план, наведений у табл. 4, з такими самими інтервалами варіювання факторів, як у табл. 1.

Обробка даних табл. 4 привела до такого рівняння регресії:

$$q = 0,8652 + 0,01125 z_1 + 0,00945 z_2 + 0,1664 z_3 + 0,0562 z_5. \quad (4)$$

Таблиця 3 – Умови та результати другого етапу пошуку

Номер досліді	b	c , 1/мм	x_{st} , м	u_{gt} , м/с	u_{i0} , м/с	q
7	1,853	1,4975	0,333	65	20,837	2,315
8	1,856	1,495	0,316	67,5	20,674	1,941
9	1,859	1,4925	0,299	70	20,511	1,632
10	1,862	1,49	0,282	72,5	20,348	1,377
11	1,865	1,4875	0,265	75	20,185	1,171
12	1,868	1,485	0,248	77,5	20,022	1,004
13	1,871	1,4825	0,231	80	19,859	0,865

Таблиця 4 – Умови та результати третього етапу

Номер досліді	z_1	z_2	z_3	z_5	q
14	1	-1	-1	1	0,7568
15	-1	1	-1	1	0,7532
16	-1	-1	1	1	1,067
17	1	1	1	-1	0,9961

Таблиця 5 – Умови та результати четвертого етапу

Номер досліду	b	c , 1/мм	x_{st} , м	u_{i0} , м/с	q
18	1,8176	1,5768	0,131	20,482	0,6246
19	1,8142	1,5711	0,081	20,105	0,5159
20	1,8108	1,5654	0,031	19,728	0,4251
21*	1,8087	1,5619	0	19,494	0,3760

* Останній крок зменшено, щоб не вийти за межі допустимого діапазону значень x_{st} .

З урахуванням (4) реалізуємо четвертий етап пошуку – крутий спуск у чотиривимірному факторному просторі від кращої точки A_2 (дослід 15). Кроки зміни факторів знаходяться як і раніше. Ці результати зібрано у табл. 5.

Четвертий етап дозволив знизити величину q ще вдвічі порівняно із точкою A_2 і привів нас на границю області пошуку $x_{st} = 0$ (дослід 21, цю точку позначаємо через A_3). Слід підкреслити, що останній дослід забезпечує дуже високу ефективність процесу уловлювання ($\eta \approx 99,62\%$), проте цікаво дізнатись, чи є можливість подальшого його покращення. Аналіз рівняння регресії свідчить про те, що початковий фракційний склад крапель у межах табл. 1 чинить найменший вплив на ефективність уловлювання частинок, оскільки внесок механізму аеродинамічного подрібнення істотно зростає з підвищенням δ_{i0} , тобто багатозафазний потік немов би сам вибирає зручний для нього фракційний склад крапель. Тому було вирішено, замість пошуку оптимуму у тривимірному просторі, спочатку дослідити вплив u_{i0} (п'ятий етап), а вже потім вивчити фактори z_1 і z_2 (див. табл. 2 і 4). Наведемо деякі результати розрахунків з різними u_{i0} та значеннями інших параметрів для точки A_3 :

u_{i0} , м/с	5	10	15	19,5	25
q	0,228	0,263	0,313	0,376	0,477.

Таким чином, треба вибрати мінімальну початкову швидкість крапель, що дозволить зменшити q більше ніж у 1,5 раза.

Нарешті, останній (шостий) етап пошуку пов'язаний із дослідженням впливу фракційного складу вихідних крапель. Розрахунки для різних точок (b , c) у табл. 1 дають $q = 0,225 - 0,229$, при цьому краща ефективність відповідає мінімальній моді розподілу (2) (подібно до [3]).

Для розв'язання другої задачі вибираємо згідно з [4, 5] прямокутну область $L_1 = 0,5 - 1$ м; $L_2 = 0,15 - 0,55$ м, що відповідає кодовим позначенням нових змінних $z_1 = (L_1 - 0,75)/0,25$ та $z_2 = (L_2 - 0,35)/0,2$. Шукане рівняння регресії має вигляд

$$\eta^o = a + bz_1 + cz_2 - dz_1 z_2 - ez_1^2 - fz_2^2, \tag{5}$$

де $\eta^o = \eta - 95\%$. Отже, треба провести шість числових експериментів. План, що було реалізовано для пошуку коефіцієнтів рівняння (5), наведено у табл. 6, а рівняння регресії таке:

Таблиця 6 – Вихідні дані для пошуку коефіцієнтів рівняння (5)

Номер досліду	1	2	3	4	5	6
L_1 , м	0,5	0,5	1	0,75	1	1
z_1	-1	-1	1	0	1	1
L_2 , м	0,15	0,55	0,35	0,55	0,15	0,55
z_2	-1	1	0	1	-1	1

$$\eta^{\circ} = 2,0725 + 0,4875 z_1 + 0,5125 z_2 - 0,0475 z_1 z_2 - 0,41 z_1^2 - 0,115 z_2^2. \quad (6)$$

Відшуковуючи точку, де $\partial\eta^{\circ}/\partial z_i = 0$, знаходимо $z_1 = 0,471$; $z_2 = 2,131$. Таким чином, точка максимуму функції (6) розташована поза область пошуку, вказану вище; отже, залишається вибрати оптимальну точку на прямій $z_2 = 1$. Тут теж було побудовано квадратичне рівняння регресії

$$\eta^{\circ} = 2,47 + 0,44 z_1 - 0,41 z_1^2 \quad (7)$$

і знайдено максимум функції відгуку, якому відповідає $z_1 = 0,537$. При цьому маємо $\eta^{\circ} = 2,588$.

ВИСНОВКИ

Аналіз фізичних явищ, що мають місце у полідисперсному трифазовому потоці, який реалізується у скрубери Вентурі, показав, що оптимальні умови уловлювання частинок слід відшукувати у семивимірному просторі $b, c, u_{gt}, u_{i0}, x_{st}, L_1, L_2$, оскільки інші параметри, які істотно впливають на ефективність уловлювання, змінюються мало або задаються технологічними умовами. Для спрощення задачу розбито на дві: у першій методом крутого спуску розглядаються режимні параметри, у другій методом квадратичної апроксимації – геометричні. Встановлено, що оптимальні умови роботи труби Вентурі відповідають мінімально можливим значенням u_{i0} та x_{st} , максимальним швидкостям газу в горловині труби u_{gt} і розподілам крапель за розмірами із мінімальною модою. Для типового режиму наведено приклад пошуку оптимальних геометричних характеристик скрубера Вентурі.

1. Шрайбер О.А. Моделирование процесса мокрой очистки димовых газов от леткой золи / О. А. Шрайбер, I. В. Федінчик // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 86 – 92.
2. Shraiber A.A. Modeling of the process of ash removal from gas in a Venturi scrubber with regard for the turbulent fluctuations of particle velocity / A.A. Shraiber, I.V. Antonets // Problems of general energy. – 2014. – Issue 3 (38). – P. 57 – 61.
3. Шрайбер О.А. Визначення оптимального режиму роботи порожнистого скрубера для очистки газів від твердих частинок / О.А. Шрайбер, I. В. Антонеч // Проблеми загальної енергетики. – 2016. – Вип. 2 (45). – С. 57 – 60.
4. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И. К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
5. Алиев Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г. М.-А. Алиев. – М.: Metallurgiya, 1986. – 544 с.
6. Кропп Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях / Л.И. Кропп, А. И. Акбрут. – М.: Энергия, 1977. – 160 с.

Надійшла до редколегії 15.09.2016 року