Захист навколишнього середовища

УДК 66.074.2

DOI: 10.33070/etars.3.2021.07

Вольчин І.А., докт. техн. наук, ORCID: 0000-0002-5388-4984,
Ращепкін В.А., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-8031-563X
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Моделювання процесу очищення запиленого газового потоку в рамках кінематичної моделі взаємодії дисперсних частинок та крапель у мокрому скрубєрі

Запропоновано математичну модель захоплення дисперсних частинок краплями у мокрому скрубєрі в умовах надлишкового зрошення труби Вентурі в наближенні кінематичної взаємодії частинок у зустрічних газодисперсних потоках, яка уточнює існуючу інженерну модель, враховуючи просторову зміну розміру крапель за рахунок їх коагуляції з частинками пульпи та не вловлених частинок, що надходять у мокрий скрубєр з труби Вентурі. Результати розрахунків з використанням математичної моделі показали, що за можливості організації в скрубєрі зрошення газового потоку крапельним аерозолем з діаметрами крапель 300–500 мкм при питомій щільності зрошення близько 1 л/м³ шар крапель протяжністю 1–2 м забезпечує ефективне поглинання не вловлених у трубі Вентурі твердих частинок класу РМ2.5 та крапель пульпи. Виліт крапель пульпи з труби Вентурі та пов'язане з цим збільшення розміру крапель скрубєра за рахунок коагуляції з краплями пульпи помітно не позначається на ефективності очищення газового потоку. Математичну модель було застосовано для розрахунку ефективності захоплення частинок краплями в мокрих скрубєрах циліндричної й конічної форми. За рахунок збільшення часу перебування крапель при збільшенні швидкості зустрічного газового потоку ефективність очищення від дисперсних частинок у конічному скрубєрі виявляється більшою, ніж у циліндричному скрубєрі. Однак при збільшенні щільності зрошення понад 2 л/м³ та діаметрах крапель більше 1000 мкм ефективність конічного скрубєра знижується, що пов'язано з ростом втрат значної частки масивних крапель внаслідок їхнього уходу на стінки при скороченні перетину реактора скрубєра. *Бібл. 21, рис. 4.*

Ключові слова: пилоочищення, крапельна пульпа, мокрий скрубєр, труба Вентурі, щільність зрошення.

Задача ефективного очищення відхідних газів від дисперсних частинок та газоподібних забруднюючих речовин для великих спалювальних установок вирішена застосуванням високоефективних електрофільтрів та установок DeSO_x й DeNO_x [1, 2]. Використання такого обладнання для промислових установок середньої потужності може не бути економічно виправданим, проте впровадження жорсткіших вимог до рівнів викидів для практично усіх промислових установок [3, 4] вимагає спеціальних рішень для установок невеликого масштабу та продуктивності з метою забезпечення достатнього ступеня очищення. Зміна розмірів газоочисних установок призводить до зміни масштабу процесів, що у них відбуваються, та вимагає вивчення факторів, які впливають на ефективність роботи менш великих установок.

Серед технологій мокрого очищення відхідних промислових газів від зважених часток найбільшу ефективність мають мокрі скрубери з трубою Вентурі [2, 5]. Раніше під час проектування мокрих скрубєрів з трубою Вентурі, призначених виключно для пилоочищення промислових газів, співвідношення рідини : газ (L/G) при зрошенні газу в трубі Вентурі обмежувалося рівнем не вище $0,2 \text{ л/м}^3$ [6]. Таке обмеження було пов'язане з тим, що за відсутності у системі газоочищення апаратів мокрого сіркоочищення при зростанні величини L/G відбувалося захоплення газу через процеси нагрівання та випаровування крапель у трубі Вентурі так, що температура газу могла досягати точки роси. Це могло призводити до корозії обладнання за мокрим скрубєром. З посиленням граничних значень викидів досягти необхідного ступеня пилоочищення при колишніх низьких рівнях зрошення стає проблематичним. Радикальне зниження викидів дисперсних частинок за рахунок підвищення рівня зрошення у трубі Вентурі зі співвідношенням $L/G > 0,4 \text{ л/м}^3$ [7] вимагає одночасного вирішення задачі очищення газового потоку від кислотоутворюючих газів. Тому інтерес становить розгляд можливості суміщення в мокрому скрубєрі за трубою Вентурі функції пилоочищення й очищення димових газів від діоксиду сірки розпиленням у забрудненому газовому потоці достатньої кількості крапель водорозчинного реагенту. Для з'ясування можливостей такого суміщення задач необхідно більш детально вивчити процеси очищення газу в мокрому скрубєрі,

динаміку взаємодії газо-крапельних потоків, можливий вплив розмірів й геометрії реактора скрубєра.

У класичній схемі мокрого скрубєра з трубою Вентурі для пилоочищення застосовуються відцентрові крапельловники циклонного типу, які мають найбільшу ефективність уловлювання пульпи та не уловленого у трубі Вентурі пилу. При використанні крапельловника циклонного типу з радіальною подачею водорозчинного реагенту з центральної області такого скрубєра утворюються схрещені потоки газу, що очищується, та крапель реагенту. При радіальному розпилюванні краплі реагенту досить швидко потрапляють на стінки. Така схема для забезпечення необхідного ступеня очищення газу передбачає прокачування через апарат значної кількості рідкого реагенту, який при цьому використовується недостатньо ефективно.

У разі застосування порожнистого мокрого скрубєра як крапельловника потік газу, що очищується, та потік крапель зі зрошувальних форсунок спрямовані назустріч один одному; причому однією й тією кількістю рідкого реагенту здійснюється очищення більшого об'єму відхідних газів. Задача полягає у тому, щоб у такому мокрому скрубєрі кількість крапель та характер їх руху, з одного боку, забезпечували головну функцію скрубєра — ефективне захоплення дисперсних частинок з газового потоку, а з іншого боку, забезпечували якомога більш тривалий час перебування та площу контакту крапель реагенту й газу, що очищується.

Мета даної статті — пошук оптимальних рішень задачі забезпечення ефективного захоплення дисперсних частинок з газового потоку у мокрому скрубєрі та якомога більш тривалого часу перебування та площі контакту крапель реагенту й газу, що очищується, за допомогою математичного моделювання кінематичної взаємодії дисперсних частинок та крапель у різних геометричних конфігураціях мокрого скрубєра.

Продуктивність та ефективність коагулятора з трубою Вентурі. Вихідні дані для моделювання мокрого скрубєра

Для проведення розрахунків з уловлювання дисперсних частинок у порожнистому скрубєрі як вхідні дані використані результати математичного моделювання ступеня очищення запиленого газу.

ного газового потоку у трубі Вентурі [8], отримані для найменш сприятливого з точки зору пилоочищення розподілу часток леткої золи за котлами ТЕС, які спалюють антрацит та пісне вугілля, графік функції розподілу яких за масою наведений на рис. 1 (верхня крива 1) [6]. Функція розподілу за розмірами не захоплених у трубі Вентурі твердих частинок представлена нижчою кривою 2 на рис. 1. Адекватність використаної математичної моделі [8] для отримання функції розподілу часток за трубою Вентурі підтверджується експериментальними даними [6].

Рис. 1. Масовий розподіл (в частках) за розмірами частинок леткої золи перед та за трубою Вентурі при щільності зрошення у трубі Вентурі $q_w = 0,45 \text{ кг/м}^3$: 1 — типова функція розподілу частинок леткої золи з діаметрами d_p за котлами ТЕС, які спалюють антрацит та пісне вугілля; 2 — функція розподілу частинок леткої золи з діаметрами d_p за трубою Вентурі при зрошенні потоку газу краплями діаметром $d_d = 100 \text{ мкм}$.

Fig. 1. Size distribution by mass share of the fly ash particles upstream and behind the Venturi tube at $q_w = 0.45 \text{ kg/m}^3$ spray density: 1) the typical size distribution of fly ash particles with diameters d_p downstream the TPP boilers, which burn anthracite and lean coals; 2) the size distribution of fly ash particles with diameters d_p downstream the Venturi tube upon the gas flow spraying with 100 micron droplets.

Не уловлені у трубі Вентурі частинки (рис. 1, крива 2) представлені в основному двома яскраво вираженими фракціями. Перша фракція включає дрібні тверді частинки діаметром $d_p < 10 \text{ мкм}$ (PM10), які найгіршим чином уловлюються у пристроях, що використовують принцип інерційного захоплення частинок краплями [9]. Друга фракція — це дисперсні частинки в діапазоні діаметрів d_p від 40 до 70 мкм (PM40-70), що слабо уловлюються у трубі Вентурі краплями розміром $d_d = 100\text{--}150 \text{ мкм}$, які зазвичай у ній генеруються та мають найкращу поглинальну

спроможність [10, 11]. Зважаючи на близькість значень аеродинамічних діаметрів частинок PM40-70 та аеродинамічних діаметрів крапель розміром d_d , такі частинки та краплі у полі змінних швидкостей у трубі Вентурі рухаються з близькими за значенням швидкостями, тому слабо взаємодіють та погано захоплюються краплями. Таку бімодальність розподілу не уловлених краплями частинок за трубою Вентурі відзначають також інші автори [12]. Третьою фракцією дисперсних складових аерозолю, що надходить з коагулятора за трубою Вентурі на вхід порожнистого скрубера, є краплі пульпи, що містять вловлені у трубі Вентурі частинки. У результаті при моделюванні захоплення дисперсних частинок у мокрому скрубери як об'єкти, що підлягають видаленню з газового потоку, слід розглядати три основні сорти дисперсних частинок: PM10, PM40-70, краплі пульпи.

При побудові математичної моделі порожнистого мокрого скрубера були зроблені такі припущення.

1. Виконані раніше розрахунки показують [7], що скорочення розмірів крапель діаметром 100–150 мкм, що застосовуються для зрошення газового потоку у трубі Вентурі, в результаті випаровування за час їх перебування у ній майже повністю компенсується ростом крапель за рахунок захоплення ними зважених частинок. Так, за час прольоту труби Вентурі (близько 0,2 с) аеродинамічний діаметр крапель пульпи змінюється незначно — не більше ніж на 1,5 %. З цієї причини, а також з огляду на близькість значень аеродинамічних діаметрів краплі пульпи й не вловлені у трубі Вентурі частки PM40-70 надалі можна розглядати як один клас частинок — крапель з єдиним діаметром, який далі позначений d_{d100} .

2. Для типових значень запиленості потоків димових газів, наприклад, вугільних ТЕС — 20–30 г/м³, у порожнистий скрубер з коагулятора Вентурі надходить не більше 1000–1300 мг/м³ не уловлених краплями твердих частинок класу PM10 [6, 13]. При таких рівнях запиленості газового потоку на вході у скрубер збільшення ваги й об'єму крапель у скрубери за рахунок осадження на них твердих частинок PM10 є настільки незначним, що зміною діаметра крапель у скрубери в результаті уловлювання твердих частинок можна знехтувати. Навпаки, цього не можна стверджувати, коли мова йде про вплив на

зміну ваги та об'єму крапель мокрого скрубера при поглинанні у скрубери крапель пульпи $d_{d100} = 100$ мкм, що надходять з труби Вентурі при високій щільності зрошення. Якщо крапель пульпи буде досить багато, то внаслідок їх коагуляції з краплями із зустрічного потоку у нижній частині скрубера краплі реагенту, що надходять зверху, будуть рости та швидше залишати реакційну зону. В результаті такого процесу вловлювання дрібних частинок РМ10 у нижній частині скрубера може погіршитися та може зменшитися ефективність використання реагенту. У статті [14], наприклад, зазначається, що у системах DeSO_x в донній частині мокрого скрубера числа перенесення мають більш низьке значення.

3. При високих рівнях зрошення за короткий час прольоту крапель у трубі Вентурі відбувається досить інтенсивне охолодження газового потоку: для відхідних газів ТЕС — від 150°C на вході до приблизно 80°C на виході з труби Вентурі. Причому чим більшою для більш ефективного уловлювання частинок класу РМ10 буде щільність зрошення труби Вентурі, тим ближчим на виході труби Вентурі є значення температури газу до водяної точки роси. Тому в першому наближенні для цілей даного моделювання, можна вважати, що у скрубери за трубою Вентурі процеси випаровування-конденсації не чинитимуть помітного впливу на зміну розмірів крапель у мокрому скрубери.

Математична модель уловлювання частинок у порожнистому мокрому скрубери

Розглянемо кінематичну модель захоплення дисперсних частинок (пилу, крапель пульпи), що надходять з труби Вентурі, краплями у мокрому скрубери, схема якої представлена на рис.2.

У такому реакторі відбувається взаємодія двох зустрічних ламінарних полідисперсних потоків. Краплі, сформовані форсунками у верхній частині скрубера, опускаючись під дією сили тяжіння, за час їх перебування у скрубери поглинають усі дисперсні частинки з висхідного потоку, що зустрічаються на їхньому шляху. Таку модель іноді називають «циліндричною», оскільки вважається, що краплі у скрубери рухаються прямолінійно й область захоплення таких крапель має вигляд циліндра.

Існуюча інженерна «циліндрична» модель [15, 16], досить часто використовується дослідни-

Рис. 2. Схема реактора порожнистого мокрого скрубера.

Fig. 2. Scheme of the wet scrubber reactor.

ками, дає можливість оцінити ефективність уловлювання дисперсних частинок краплями у порожнистому скрубери за такою формулою:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2}\eta_\Sigma \frac{q_w}{D_d \cdot \rho_l} \cdot \frac{V_t}{V_d} \cdot L\right), \quad (1)$$

де η_Σ — коефіцієнт захоплення твердих частинок діаметром d_p на сферичних краплях діаметром D_d , які генеруються зрошувальною форсункою; q_w — витрата води на зрошення запиленого потоку газу у скрубери, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_l — густина води, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_t — швидкість витання крапель діаметром D_d у висхідному потоці газу зі швидкістю V_g , $\text{м}/\text{с}$; V_d — швидкість крапель діаметром D_d відносно стінок скрубера, $\text{м}/\text{с}$; L — активна висота, м .

Формула (1) надає приблизну оцінку, оскільки не враховує зміни діаметра та швидкості крапель по висоті реактора. У формулі (1) всі величини, за винятком лише густини води ρ_l ,

слід вважати змінними вздовж порожнистого скрубера, причому деякі з них є ще й сильно змінними величинами. З урахуванням просторової зміни діаметра, швидкості й коефіцієнта захоплення дисперсних частинок краплями формула (1) відповідним чином має бути модифікована, тоді вираз для ефективності уловлювання частинок краплями у порожнистому мокрому скрубери набуває такого вигляду:

$$\eta = 1 - \exp \left(- \frac{3q_w}{2\rho_l} \int_0^L \eta_\Sigma(x) \cdot \left(\frac{D_d^2(x)}{D_d^3(L)} \right) \cdot \frac{V_t(x)}{V_d(x)} \cdot dx \right). \quad (2)$$

На відміну від формули (1) у показнику експоненціальної функції у рівнянні (2) підінтегральний вираз містить величини, що змінюються по висоті скрубера.

Для визначення ефективності уловлювання порожнистого мокрого скрубера η вираз (2) слід доповнити рівняннями для швидкості крапель та частинок, а також рівнянням зміни розміру крапель. Тому перейдемо до рівнянь зміни швидкості та розміру крапель, зробивши попередньо зауваження щодо способу визначення коефіцієнта захоплення частинок краплями $\eta_\Sigma(x)$.

Коефіцієнт захоплення частинок η_Σ сферичною краплею є ймовірнісною характеристикою. Для умов інерційного механізму захоплення він має дві складові, які враховують ефект зачеплення частинок краплями η_t , інерційний осадження частинок на краплях η_i , а для дрібних частинок враховують також броунівську дифузію частинок до крапель η_d , так що в результаті $\eta_\Sigma = \eta_d + \eta_t + \eta_i \leq 1$. Згідно оцінок [17], броунівська дифузія частинок діаметром більше 1 мкм має дуже слабкий вплив на ймовірність їх захоплення краплями за час перебування у скрубери, а для інерційного осадження та зачеплення користуються єдиною апроксимацією. При проведенні розрахунків у нашій моделі для коефіцієнта осадження за інерційним механізмом прийнята така часто використовувана апроксимація [12, 15, 18, 19]:

$$\eta_\Sigma = \left(\frac{Stk}{Stk + 0,35} \right)^2, \quad (3)$$

в якій коефіцієнт захоплення частинок краплями η_Σ у зустрічному потоці є функцією критерія Стокса:

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 (V_p + V_d) C_c}{18 \cdot \mu D_d}, \quad (4)$$

де ρ_p — густина матеріалу частинок, кг/м³; V_p — швидкість частинок (пульпи), м/с; C_c — поправка Каннінгема (для дисперсних частинок діаметром 2 мкм ця поправка становить близько 1,25, для більш крупних частинок — прагне до одиниці); μ — динамічна в'язкість газу, Па·с.

Як видно, до визначення критерію Стокса також входять швидкість та діаметр крапель, які у нашій задачі змінюються по висоті реактора.

Швидкість крапель V_d у порожнистому мокрому скрубери, що падають під дією сили тяжіння, з урахуванням опору газу й зміни розміру у припущенні про збереження сферичної форми крапель визначається з рішення диференціального рівняння:

$$V_d(x) \frac{dV_d(x)}{dx} + \frac{3V_d^2(x)}{D_d(x)} \cdot \frac{dD_d(x)}{dx} + \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_g v_g}{\rho_l} \frac{V_g + V_d(x)}{D_d^2(x)} - g = 0; \quad (5)$$

$$\zeta \cdot Re = [24 + 4 \cdot \sqrt{\frac{[V_g + V_d(x)]}{v_g}} \cdot D_d(x) + 0.4 \cdot \frac{[V_g + V_d(x)]}{v_g} \cdot D_d(x)],$$

де $D_d(x)$ — змінний діаметр краплі, м, що падає у полі тяжіння з прискоренням вільного падіння g , м/с²; ζ — коефіцієнт аеродинамічного опору краплі; ρ_g — густина газу, кг/м³; v_g — кінематична в'язкість газу, м²/с; Re — число Рейнольдса для краплі.

Для коефіцієнта аеродинамічного опору ζ у рівнянні (5) прийнята відома апроксимація [20], яка використовується у широкому діапазоні значень числа Рейнольдса.

Розглянемо рівняння, що описує зміну розміру крапель. При обраному на рис. 2 початку та напрямку осі x розмір падаючих крапель, які є мішенями у мокрому скрубери, що рухаються зверху вниз назустріч газовому потоку, зростає по мірі їх просування уздовж осі x на дно скрубера за рахунок поглинання все більшої кількості крапель пульпи та не уловлених частинок РМ40-70, що надходять у порожнистий скрубери

з труби Вентурі. Рівняння для зміни діаметра падаючих крапель можна отримати диференціюванням рівняння зміни об'єму краплі:

$$D_d(x)^3 = D_d(L)^3 + d_{d100}^3 \cdot \int_x^L \eta_{\Sigma d,p}(\xi) \cdot \frac{\pi D_d^2(\xi)}{4} \cdot \frac{V_g + V_d(\xi)}{V_d(\xi)} \cdot n_{d,p}(\xi) d\xi, \quad (6)$$

де d_{d100} — діаметр крапель пульпи діаметром 100 мкм.

Вище зазначалося, що зміна розмірів крапель у скрубєрі в наближенні даної моделі пов'язано виключно із захопленням крапель пульпи та частинок РМ40-70 з труби Вентурі.

Для проведення розрахунків доцільно проноормувати величини концентрації частинок, крапель пульпи та діаметра крапель таким чином:

$$\bar{n}(x) = \frac{n_{p,d100}(x)}{n_{p,d100}(0)}; \quad \bar{D}(x) = \frac{D_d(x)}{D_d(L)},$$

де $n_{p,d100}$ — концентрація частинок пилу РМ10 або крапель пульпи та частинок РМ40-70, що надходять з труби Вентурі у порожнистий скрубєр; $D_d(L)$ — початковий діаметр крапель, на яких відбувається осадження у скрубєрі.

Тоді для зміни концентрації уловлюваних частинок (крапель), діаметра та об'єму, а також швидкості крапель з рівнянь (2), (5), (6) маємо систему диференціальних рівнянь з граничними умовами:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{n}(x)}{dx} &= -\phi(x) \cdot \bar{D}^2(x) \cdot \bar{n}(x); \\ \frac{d\bar{D}(x)}{dx} &= -\frac{\alpha}{3} \cdot \phi(x) \cdot \bar{n}(x); \\ \frac{d\bar{D}(x)^3}{dx} &= -\alpha \cdot \phi(x) \cdot \bar{D}^2(x) \cdot \bar{n}(x); \\ V_d(x) \frac{dV_d(x)}{dx} + \frac{3V_d^2(x)}{\bar{D}(x)} \cdot \frac{d\bar{D}(x)}{dx} + \\ &+ \frac{3}{4} \bar{\zeta} \frac{\rho_g \nu_g}{\rho_l} \frac{V_g + V_d(x)}{\bar{D}^2(x) \cdot D_d^2(L)} - g = 0; \\ \bar{n}(0) &= 1; \quad \bar{D}(L) = \bar{D}(L)^2 = \bar{D}(L)^3 = 1, \\ V_d(L) &= V_{sc}. \end{aligned} \quad (7)$$

де прийняті такі позначення:

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \frac{3}{2} \cdot \frac{q_{wVent}}{\rho_l D_d(L)} \cdot \eta_{\Sigma}(x) \cdot \frac{V_g + V_d(x)}{V_d(x)}; \\ \alpha &= \frac{q_{wVent}}{q_w}; \end{aligned} \quad (8)$$

q_{wVent} — об'ємна витрата пульпи на виході труби Вентурі, кг/м³; q_w — витрата води на зрошення потоку газу в скрубєрі, кг/м³; V_{sc} — усталена швидкість крапель на осі реактора скрубєра на віддаленні від форсунки, м/с; $\eta_{\Sigma}(x)$ визначено у (3), (4); V_d та V_g є ненормованими величинами, оскільки до рівняння (7) й (8) входять відношення значень швидкостей.

Коефіцієнт аеродинамічного опору крапель ζ нормується з урахуванням нормування діаметра краплі:

$$\begin{aligned} \bar{\zeta} \cdot \text{Re} &= [24 + 4 \cdot \sqrt{\frac{[V_g + V_d(x)]}{\nu_g}}] \cdot \bar{D}(x) \cdot D_d(L) + \\ &+ 0.4 \cdot \frac{[V_g + V_d(x)]}{\nu_g} \cdot \bar{D}(x) \cdot D_d(L). \end{aligned}$$

Існує певна проблема формулювання граничних умов у системі рівнянь (7), яка полягає у тому, що $\bar{D}(0)$, $V_d(0)$ наперед невідомі, оскільки значення величини діаметра та, відповідно, швидкості крапель у точці $x = 0$ залежать від передісторії захоплення цими краплями у скрубєрі частинок та крапель, що надходять у скрубєр з труби Вентурі, ще до моменту досягнення падаючими краплями дна скрубєра.

Тоді умови у точці $x = 0$ слід розглядати так: $\bar{D}(0) = \bar{D}(L) + \delta$, $V_d(0) = V_d(L) + \varepsilon$. Граничні умови у системі рівнянь (7) слід трактувати у тому сенсі, що при $x \rightarrow \infty$, тобто на віддаленні від дна скрубєра, рішення для діаметра та швидкості крапель для умов даної моделі мають набувати сталих значень на віддаленні від зрізу форсунки, а величини δ та ε обираються таким чином, щоб у процесі обчислень задовольнити цій умові.

Із системи рівнянь (7) витікає таке диференціальне рівняння:

$$\alpha \cdot \frac{d\bar{n}(x)}{dx} = \frac{d\bar{D}(x)^3}{dx}.$$

Це рівняння пов'язує зміну об'єму крапель із зменшенням концентрації крапель пульпи, що уловлюються. Якби у скрубери не надходили краплі пульпи з коагулятора з трубою Вентурі ($q_{wVent} = 0$), то було б $\alpha = 0$ та для визначення ефективності скрубера мало місце рівняння (1) з $D_d = const$.

Рішення системи (7) для зміни концентрації частинок (крапель пульпи), що надходять у порожнистий скрубери з труби Вентурі, має вигляд:

$$\bar{n}(x) = \exp \left(- \int_0^x \phi(\xi) \cdot \bar{D}^2(\xi) d\xi \right). \quad (9)$$

Очевидно, що частинки пилу та краплі пульпи уловлюватимуться у скрубери тим ефективніше, чим більшим буде значення показника експоненціальної функції.

Величина показника експоненти у рівнянні (9) залежить від площі перетину крапель $\bar{D}^2(x)$, що генеруються форсунками скрубера, яка збільшується за умовами прийнятої моделі у процесі падіння крапель за рахунок зростання їх об'єму в результаті захоплення крапель пульпи із зустрічного потоку газу. Слід враховувати, що, хоча з ростом розміру крапель вони стають кращими мішенями для захоплення пилу, разом з ростом розміру крапель скрубери зростає їх швидкість, а отже, скорочується час їх перебування у реакційній зоні.

З рівнянь (8) видно, що зростання діаметра, площі перетину та, відповідно, швидкості крапель веде до одночасного зменшення значення функції $\phi(x)$, оскільки $V_d(x)$ зі збільшенням діаметра крапель також зростає, а коефіцієнт захоплення $\eta_z(x)$ твердих частинок великими краплями знижується. Ще однією причиною зростання площі перетину крапель та більш швидкого виходу з реакційної зони є коагуляція крапель у середині ансамблю крапель у гравітаційному полі по мірі їхнього падіння з різними швидкостями. Це вимагає окремого розгляду, оскільки інтенсивність процесів «внутрішньої» коагуляції крапель у потоці та відповідне до цього зростання $\bar{D}^2(x)$ залежать від витрати рідини q_w , збільшення якої, з іншого боку, підвищує ефективність уловлювання твердих частинок.

Результати математичного моделювання

Рішення системи рівнянь (7) дає можливість визначати просторову зміну концентрації части-

нок класу PM10 $n_p(x)$ та крапель пульпи $n_{d100}(x)$, а також просторову зміну діаметра $D_d(x)$, що у сукупності визначає ефективність очищення газового потоку за умов змінності діаметра крапель.

Для з'ясування факторів, що впливають на ефективність уловлювання зважених частинок краплями у порожнистому скрубери в умовах, коли у трубі Вентурі організовано надмірне зрошення газового потоку та відбувається винесення значного обсягу пульпи у скрубери, була розглянута така модельна задача: форсункою на деякому віддаленні від її зрізу формуються краплі єдиного діаметру 300 мкм, які під дією сили тяжіння рухаються назустріч газовому потоку, швидкість якого становить 1 м/с. При цьому краплі не подрібнюються, не коагулюють одна з одною, не випаровуються та не ростуть за рахунок конденсації. Швидкість витання таких крапель V_t становить приблизно 1,03 м/с, тому в зустрічному потоці газу, що має швидкість $V_g = 1$ м/с, краплі відносно стінок реактора опускаються з малою швидкістю $V_d = V_t - V_g = 0,03$ м/с, що істотно подовжує час їх перебування у мокрому скрубери.

Оцінимо вплив наявності виносу крапель пульпи з труби Вентурі на розмір та швидкість крапель скрубери. При $\alpha = 0,5$, коли об'ємні витрати води на виході труби Вентурі та у скрубери приймають значення $q_{wVent} = 0,5$ кг/м³ та $q_w = 1,0$ кг/м³, на одну краплю діаметром $D_d = 300$ мкм в одиниці об'єму припадає 15 крапель пульпи $d_{d100} = 100$ мкм, тому за час падіння діаметр краплі у скрубери зростає до $D_d = 345$ мкм, її швидкість V_g збільшується від 1,03 м/с до 1,25 м/с на дні реактора. Зростання розміру та швидкості крапель призводить до їх більш швидкого виходу з реакційної зони, що має впливати на ефективність очищення в цілому. З використанням математичної моделі (7) були проведені розрахунки для визначення просторової динаміки захоплення дисперсних частинок PM10 краплями у скрубери при наявності та відсутності потрапляння крапель пульпи з труби Вентурі у скрубери. Дані розрахунків просторового розподілу частинок $n_p(x)$ при захопленні їх краплями скрубери для різних співвідношень q_{wVent} та q_w представлені на рис. 3.

Клас PM10 дисперсних частинок, що уловлюються, представлений частинками з діаметрами $d_p = 2, 4, 6, 8, 10$ мкм. Як слід було очікувати, з усього класу PM10 найгіршим чином у мокрому

Рис. 3. Просторові зміни нормованого діаметра крапель $D_d = 300$ мкм та розподілу нормованої концентрації $n_p(x)/n_p(0)$ частинок $d_p = 2, 4, 6, 8, 10$ мкм при різних співвідношеннях витрат пульпи та щільності зрошення у циліндричному мокрому скрубєрі: а – $q_w = 1.0$ кг/м³, $q_{wVent} = 0.5$ кг/м³; б – $q_w = 1.0$ кг/м³, $q_{wVent} = 0.0$ кг/м³; в – $q_w = 0.5$ кг/м³, $q_{wVent} = 0.5$ кг/м³; г – $q_w = 0.5$ кг/м³, $q_{wVent} = 0.0$ кг/м³.

Fig. 3. Spatial variation of the normalised diameter of $D_d = 300$ μ m droplets and of the normalised concentration $n_p(x)/n_p(0)$ of particles $d_p = 2, 4, 6, 8, 10$ μ m at different ratios of the slurry flow rate and spray density in a cylindrical wet scrubber: a) $q_w = 1.0$ kg/m³, $q_{wVent} = 0.5$ kg/m³; b) $q_w = 1.0$ kg/m³, $q_{wVent} = 0.0$ kg/m³; c) $q_w = 0.5$ kg/m³, $q_{wVent} = 0.5$ kg/m³; d) $q_w = 0.5$ kg/m³, $q_{wVent} = 0.0$ kg/m³.

скрубєрі уловлюються частинки $d_p = 2$ мкм. Однак потрібно враховувати, що для розрахованого вихідного розподілу часток за розмірами за трубою Вентурі на частинки $d_p = 2$ мкм припадає до 25 % маси усіх дисперсних частинок, що не були уловлені краплями у трубі Вентурі. Тому важливо визначити умови, за яких відбувається максимальне уловлювання таких часток, оскільки більші частинки уловлюються з більшою ефективністю.

На рис. 3,а видно, що при організації розпилювання води у мокрому скрубєрі на краплі діаметром $D_d = 300$ мкм при щільності зрошення $q_w = 1.0$ кг/м³ частинки діаметром 2 мкм уловлюються на досить короткій дистанції від дна (входу газів) скрубєра – близько 1 м. Ефективність уловлювання пилу краплями $D_d = 300$ мкм

настільки висока, зважаючи на їх концентрацію та час перебування у скрубєрі, що наявність крапель пульпи, що надходять з труби Вентурі, практично не позначається на глибині поглинання часток $d_p = 2$ мкм у порівнянні з випадком, коли краплі пульпи з труби Вентурі не надходять у скрубєр (рис. 3,б). Самі краплі пульпи $d_{d100} = 100$ мкм з труби Вентурі, згідно даних розрахунку, уловлюються краплями $D_d = 300$ мкм на глибині близько 0,1 м від дна мокрого скрубєра (на графіках не показано).

Результати розрахунків також демонструють, що при скороченні щільності зрошення скрубєра вдвічі, до $q_w = 0.5$ кг/м³, вдвічі зростає висота шару поглинання часток $d_p = 2$ мкм – до 2 м (рис. 3,в та 3,г). Наявність крапель пульпи, що надходять з труби Вентурі, дещо погіршує улов-

лювання частинок на дні скрубера (рис. 3,с), але у цілому дуже слабо впливає на глибину поглинання часток РМ10.

З наведених результатів розрахунків за математичною моделлю (7) можна зробити такі висновки. Якщо у скрубери організовано зрошення газового потоку краплями діаметром $D_d = 300$ мкм, розмір яких змінюється лише на підході до дна скрубера за рахунок захоплення ними крапель пульпи з труби Вентурі, а самі краплі повільно опускаються уздовж осі реактора у зустрічному потоці газу зі швидкістю $V_g = 1$ м/с, то при щільності зрошення скрубера q_w близько $1,0$ кг/м³ поглинання часток РМ10 аж до діаметрів $d_p = 2$ мкм відбувається ефективно на коротких дистанціях — близько 1 м. Причому при таких параметрах крапель виліт навіть значного обсягу крапель пульпи $d_{d100} = 100$ мкм з труби Вентурі у скрубери практично не позначається на ефективності уловлювання дисперсних частинок РМ10 з газового потоку. У всякому разі перед порожнистим скрубери не потрібно застосування додаткових заходів, крім наявних: зазвичай поворотного коліна та іноді застосовуваного басейну рідини для уловлювання виносу з труби Вентурі. А заміна краплєвловника мокрим скрубери цілком обґрунтована.

Незважаючи на настільки позитивний результат захоплення частинок $d_p = 2$ мкм краплями $D_d = 300$ мкм у висхідному газовому потоці, в якому такі краплі є «майже підвішеними», необхідно визнати, що організувати протяжний потік крапель одного діаметра, що повільно опускається уздовж осі реактора, важко: тривалому існуванню такого потоку в полі тяжіння буде перешкоджати коагуляція крапель всередині насправді полідисперсного потоку крапель, що генерується форсунками. В результаті коагуляції крапель кількість великих крапель у потоці по мірі просування уздовж реактора збільшується, а дрібних зменшується.

Становить інтерес розглянути, яким чином на ефективності скрубера буде позначатися присутність зростаючої кількості великих крапель. Ясно, що картина має змінюватися, оскільки великі краплі швидше полишають реакційну зону. Прискорення зростаючих в об'ємі крапель можна було б сповільнити збільшенням швидкості зустрічного висхідного газового потоку на певній ділянці порожнистого мокрого скрубера. Відповідним рішенням для цього є застосування реактора з конусною донною частиною [21].

У такому випадку в нижній частині скрубера швидшим висхідним потоком газу будуть на більш тривалий час затримуватися краплі, що збільшуються в результаті коагуляції, які б інакше швидше покинули зону реагування. Однак застосування такого рішення може бути ефективним при виконанні певних умов.

Одна з таких умов полягає у тому, що у наближенні ламінарного однорідного потоку параметри конуса мають бути такі, щоб втрати крапель в результаті їхнього уходу на стінки при вертикальному падінні не перевищували переваги від більш тривалого перебування крапель у нижній реакційній зоні скрубера, що забезпечується параметрами конічної частини скрубера.

З огляду на зауваження, зроблені у попередньому абзаці, побудована модель (7) була застосована для дослідження просторової динаміки захоплення частинок РМ10, коли краплями-мішенями є більш великі краплі, наприклад, краплі діаметром $D_d = 500$ мкм, у скрубери циліндричної форми та у скрубери з конічною донною частиною. Дані результатів розрахунку для таких крапель при різних витратах рідини на зрошення q_w , але при тій же швидкості висхідного газового потоку $V_g = 1$ м/с в основному обсязі реактора, що і для випадку крапель $D_d = 300$ мкм, зведені на рис. 4.

На рис. 4 представлені результати розрахунку для двох варіантів конструкції скрубера: скрубера з конічною донною частиною (ліва колонка) та скрубера з реактором у вигляді циліндра постійного перетину (права колонка). При проведенні розрахунків змінювалися абсолютні витрати рідини q_{wVent} й q_w та їх співвідношення α у рівняннях (8). Розміри конічної донної частини скрубера були обрані довільно, але таким чином, щоб на висоті 2 м від дна скрубера швидкість висхідного потоку, як і раніше, становила $V_g = 1$ м/с та на дні скрубера дорівнювала $1,87$ м/с, що відповідає швидкості витання крапель $D_d = 500$ мкм. Крім того, на рис. 4,с представлений результат розрахунку для більших крапель, діаметром 1000 мкм.

Порівнюючи результати розрахунків у двох колонках на рис. 4,а, можна бачити, що у разі застосування конусної конструкції донної частини скрубера при витратах рідини $q_w = 1,0$ кг/м³ уловлювання частинок РМ10 краплями $D_d = 500$ мкм відбувається з удвічі більшою ефективністю, ніж у разі циліндричної конструкції. Причому ефективність захоплення частинок

Рис. 4. Просторові зміни нормованої концентрації $n_p(x)/n_p(0)$ частинок $d_p = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ мкм}$ у циліндричному та конічному мокрих скруберах при різних рівнях зрошення скрубера q_w [кг/м³] та обсягах пульпи q_{wVent} [кг/м³]. Довжина конічної частини $L_{con} = 2 \text{ м}$; швидкість потоку газу $V_g = 1 \text{ м/с}$.

Fig. 4. Spatial variation of the normalised concentration $n_p(x)/n_p(0)$ of $d_p = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ }\mu\text{m}$ particles in cylindrical and conical wet scrubbers at various spraying levels q_w [kg/m³] and slurry consumption q_{wVent} [kg/m³]. Length of the conical part $L_{con} = 2 \text{ m}$; gas flow velocity $V_g = 1 \text{ m/s}$.

зростає зі збільшенням витрат рідини на зрошення, як і у циліндричному скрубєрі (рис. 4,а та 4,б).

Однак дані рис. 4,б показують можливість зниження ефективності при використанні скрубєра з конічною донною частиною. Річ у тому, що в скрубєрі з конічною донною частиною неминує відбувається відхід частини крапель на стінки до досягнення ними дна скрубєра та у конусній донній частині скрубєра ці краплі вже не беруть участі у захопленні частинок в об'ємі газового потоку. В результаті при великих витратах на зрошення втрати крапель від уходу їх на стінки стають настільки великими, що нівелюють позитивний ефект від уповільнення руху крапель у конусній частині. І хоча в циліндричному реакторі спостерігається швидший вихід великих крапель з реакційної зони скрубєра, ефективність такого скрубєра при високій щільності зрошення буде вищою за рахунок збереження більшої кількості крапель-мішеней, що поглинають дисперсні частинки з газового потоку.

Дані рис. 4,с показують, що при розпилюванні рідини форсунками скрубєра на краплі розміром $D_d = 1000$ мкм при щільності зрошення $q_w = 2,5$ кг/м³ й швидкості газу $V_g = 1$ м/с для уловлювання зважених часток $d_p = 2$ мкм не вистачить висоти 10-метрового скрубєра. Ця проблема може бути вирішена виключно за рахунок істотного підвищення витрат рідини на зрошення мокрого скрубєра або збільшення висоти скрубєра. Такий результат також підтверджує необхідність максимального уловлювання частинок діаметром $d_p = 2$ мкм (та менших) у трубі Вентурі, що можливо лише при надмірному її зрошенні.

Висновки

Результати моделювання показують, що за припущення про можливість створення у мокрому скрубєрі при щільності зрошення близько 1,0 кг/м³ шару крапель діаметром $D_d = 300$ мкм, що рухається у зустрічному потоці запиленого газу, поглинання краплями твердих частинок класу РМ10 аж до діаметрів $d_p = 2$ мкм відбувається ефективно на коротких дистанціях — приблизно 1 м. При тих же умовах зрошення скрубєра краплі пульпи та не вловлені у трубі Вентурі великі тверді частинки діаметрами $d_p = 40$ –70 мкм уловлюються на відстані близько 0,1 м від дна скрубєра. Виліт частинок та пульпи з труби Вентурі практично ніяк не позначається на ефективності мокрого скрубєра.

Оскільки організувати рівномірне зрошення скрубєра краплями єдиного розміру досить важко з огляду на неминує збільшення розміру крапель внаслідок їх коагуляції з іншими краплями при русі у гравітаційному полі, тільки застосування декількох ярусів форсунок, що забезпечують сумарну протяжність шару крапель $D_d = 300$ мкм не менше 1–2 м, може теоретично забезпечити достатній ступінь уловлювання дрібних частинок пилу. Більш реалістично забезпечити захоплення частинок діаметром $d_p = 2$ мкм (та менших) у трубі Вентурі, що можливо лише при надмірному її зрошенні зі щільністю не менш 0,45 кг/м³. Більш того, у такому випадку через заохолодження газового потоку у трубі Вентурі процеси випаровування та конденсації крапель у мокрому скрубєрі будуть дуже слабо позначатися на зміні розмірів крапель.

У разі застосування конусної конструкції нижньої частини скрубєра при витратах рідини $q_w < 2,5$ кг/м³ уловлювання частинок РМ10 відбувається краплями $D_d = 500$ мкм з удвічі більшою ефективністю, ніж у разі циліндричної конструкції, причому ефективність захоплення частинок у конусній конструкції зростає зі збільшенням витрат рідини на зрошення, як у циліндричному скрубєрі. Однак у скрубєрі з конічною нижньою частиною неминує відбувається відхід частини крапель на стінки. В результаті у конусній частині скрубєра ці краплі вже не беруть участі у захопленні частинок в об'ємі газового потоку. У підсумку, при великих витратах рідини на зрошення втрати крапель від уходу на стінки стають настільки великими, що нівелюють позитивний ефект від уповільнення руху крапель у конусній частині скрубєра.

Запропоновану модель доцільно розвивати далі для того, щоб вона враховувала роль внутрішньої коагуляції крапель мокрого скрубєра, пошуку умов якомога довшого перебування крапель реагенту в скрубєрі, можливість утворення паводкових кінематичних хвиль у реакторі зі змінним перетином, а також процеси у застійному шарі крапель.

Список літератури

1. Commission Implementing Decision (EU) 2017/1442 of 31 July 2017 establishing the best available methods (BAT) for the European Parliament. *Official Journal of the European Union*. L212. 17.8.2017. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D1442&from=EN>.

2. Thierry Lecomte, Josй Fйlix Ferrerna de la Fuente, Frederik Neuwahl, Michele Canova, Antoine Pinasseau, Ivan Jankov, Thomas Brinkmann, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. — Seville, Spain. European IPPC Bureau. 2017. 986 p. — https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC_107769_LCPBref_2017.pdf
3. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *Official Journal of the European Union*. L334. 17.12.2010. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=EN>.
4. Directive 2015/2193/EU of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. *Official Journal of the European Union*. L313. 28.11.2015. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193&from=EN>
5. Mussatti D., Pechan E.H. & Associates, Inc. Wet Scrubbers for Particulate Matter. EPA/452/B-02-001. July, 15, 2002. 64 p.
6. Кропп А.И., Акбрут Л.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. — М.: Энергия, 1977. 460 с.
7. Вольчин И.А., Ращепкин В.А. Особенности очистки дымовых газов в мокрых скрубберах с трубой Вентури в условиях избыточного орошения. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2018. № 3. С. 41–50.
8. Volchyn I., Raschepkin V., Iasynetskyi A. Flue Gas Dedusting in Venturi Scrubbers at Thermal Power Plants. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2018. Vol. 17, № 11. P. 2515–2525.
9. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г. Очистка газов : Справочное издание. — М. : Теплоэнергетик, 2002. 640 с.
10. Ravi G., Gupta S.K., Viswanathan S., Ray M.B. Optimization of Venturi Scrubbers Using Genetic Algorithm. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. Vol. 41. P. 2988–3002.
11. Costa M.A., Ribeiro A.P., Tognetti E.R., Aguiar M.L., Goncalves J.A.S., Coury J.R. Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Fine Powder from a Confined Gas Stream. *Materials Research*. 2005. Vol. 8, № 2. P. 177–179.
12. Nabil Rafidi, Fredrik Brogaard, Lei Chen, Rikard Нvkansson, Ali Tabikh. CFD and experimental studies on capture of fine particles by liquid droplets in open spray towers. *Sustainable Environment Research*. 2018. № 28. P. 382–388.
13. Jinder Jow. Resource Utilization and Management of Fly Ash. *Cornerstone. The Official Journal of the World Coal Industry*. 2016. Vol. 4, Iss. 3. P. 61–66.
14. Brogren, C., Karlsson, H.T. Modeling the absorption of SO₂ in a spray scrubber using the penetration theory. *Chem. Eng. Sci.* 1997. Vol. 52, № 18. P. 3085–3099.
15. Flagan R.C., Seinfeld J.H. Fundamentals of Air Pollution Engineering. — California Institute of Technology. PRENTICE HALL, 1988. 542 p.
16. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. — М : Металлургия, 1988. 256 с.
17. Вольчин И.А., Ращепкин В.А. Математическое моделирование процессов коагуляции частиц летучей золы с каплями жидкости в трубах Вентури мокрых скрубберов ТЭС. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2012. № 2. С. 44–53.
18. Rudnick S.N., M. Koehler J.L., Martin K.P., Leith D., Cooper D.W. Particle Collection Efficiency in a Venturi Scrubber: Comparison of Experiments with Theory. *Environ. Sci. Technol.* 1986. Vol. 20. № 3. P. 237–242.
19. Calvert S., Lundgren D., Metha D.S. Venturi Scrubber Modelling. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 1972. Vol. 22. P. 529–532.
20. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. — М. : Наука, 1987. Т. 1. 464 с.
21. Raschepkin V., Volchyn I. Simulation of the particulate matter removal process in a wet scrubber with a conical bottom at the excess liquid-to-gas ratios in the Venturi tube. *VI Міжнародний конгрес «Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» : Тези доповідей*, Львів, 23–25 вересня 2020 року. Львів: Західно-Український Консалтинг Центр (ЗУКЦ), ТОВ, 2020. С. 23.

Надійшла до редакції 20.04.21

Вольчин И.А., докт. техн. наук, ORCID: 0000-0002-5388-4984,
Ращепкин В.А., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-8031-563X
Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Моделирование процесса очистки запыленного газового потока в рамках кинематической модели взаимодействия дисперсных частиц и капель в мокром скруббере

Предложена математическая модель захвата дисперсных частиц каплями в мокром скруббере в условиях избыточного орошения трубы Вентури в приближении кинематического взаимодействия частиц во встречных газодисперсных потоках, которая уточняет существующую инженерную модель, учитывая пространственное изменение размера капель за счет их коагуляции с частицами пульпы и не уловленных частиц, поступающих в мокрый скруббер из трубы Вентури. Результаты расчетов с использованием математической модели показали, что при возможности организации в скруббере орошения газового потока капельным аэрозолем с диаметрами капель 300–500 мкм при удельной плотности орошения около 1 л/м³ слой капель протяженностью 1–2 м обеспечивает эффективное поглощение не уловленных в трубе Вентури твердых частиц класса PM2.5 и капель пульпы. Вылет капель пульпы из трубы Вентури и связанное с этим увеличение размера капель скруббера за счет коагуляции с каплями пульпы заметно не сказывается на эффективности очистки газового потока. Математическая модель была применена для расчета эффективности захвата частиц каплями в мокрых скрубберах цилиндрической и конической формы. За счет увеличения времени пребывания капель при увеличении скорости встречного газового потока эффективность очистки от дисперсных частиц в коническом скруббере оказывается большей, чем в цилиндрическом скруббере. Однако при увеличении плотности орошения выше 2 л/м³ и диаметрах капель больше 1000 мкм эффективность конического скруббера снижается, что связано с ростом утраты значительной части массивных капель вследствие их ухода на стенки при сокращении сечения реактора скруббера. *Библ. 21, рис. 4.*

Ключевые слова: пылеочистка, капельная пульпа, мокрый скруббер, труба Вентури, плотность орошения.

Volchyn I. A., Doctor of Sciences (Engineering),

ORCID: 0000-0002-5388-4984,

Raschepkin V. A., Doctor of Philosophy (Engineering),

ORCID: 0000-0002-8031-563X

Coal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
19, Andriivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Modeling of a Dusted Gas Flow Cleaning Process Using a Kinematic Model of the Interaction of Dispersed Particles with Droplets in a Wet Scrubber

The mathematical model is proposed for the scavenging process of the dispersed particles by droplets in a wet scrubber under excess spray density in Venturi tube within kinematic approach of the interaction of particles in countercurrent gas-dispersed flows, which refines the existing engineering model, taking into account the spatial size variation of the droplets, due to their coagulation with wet slurry droplets and uncaptured particles entering a wet scrubber from the Venturi tube. The results of calculations with the adopted mathematical model showed that in case of possibility to organize the spraying of a gas flow in a scrubber with 300–500 micron droplets aerosol at a specific spray density of about 1 liter/m³, a 1–2 meters wide layer of droplets ensures effective absorption of both uncaptured PM_{2.5} solid particles, and the slurry droplets from the Venturi tube. The ejection of the slurry droplets into a wet scrubber from the Venturi tube, and the associated increase in the size of the scrubber droplets due to coagulation with slurry droplets, does not noticeably affect the efficiency of the dusted gas stream cleaning. The adopted mathematical model was applied to calculate the capture of particles by droplets in cylindrical and conical scrubbers. Due to the increase in a residence time of the droplets upon increased velocity of the countercurrent gas flow, the efficiency of gas cleaning from dispersed particles in a conical scrubber appears to be higher than in a cylindrical scrubber. However, with an increase in the spray density above 2 liter/m³ and with droplet diameters greater than 1000 microns, the efficiency of the conical scrubber decreases, which is associated to an increase in the escape of a significant proportion of massive drops to the walls with a reduction in the scrubber reactor cross-section. *Bibl. 21, Fig. 4.*

Keywords: dusted flow cleaning, slurry droplets, wet scrubber, Venturi tube, spray density.

References

1. Commission Implementing Decision (EU) 2017/1442 of 31 July 2017 establishing the best available methods (BAT) for the European Parliament. *Official Journal of the European Union*. L212. 17.8.2017. – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D1442&from=EN>.
2. Thierry Lecomte, Josÿ Fÿlix Ferrerna de la Fuente, Frederik Neuwahl, Michele Canova, Antoine Pinasseau, Ivan Jankov, Thomas Brinkmann, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. – Seville, Spain. European IPPC Bureau. 2017. 986 p. – https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC_107769_LCPBref_2017.pdf
3. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *Official Journal of the European Union*. L334. 17.12.2010. – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=EN>.
4. Directive 2015/2193/EU of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. *Official Journal of the European Union*. L 313. 28.11.2015. – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193&from=EN>
5. Mussatti D., Pechan E.H. & Associates, Inc. Wet Scrubbers for Particulate Matter. EPA/452/B-02-001. July, 15, 2002. 64 p.
6. Kropp A.I., Akbrut L.I. [Ash precipitators with Venturi tubes at thermal power plants]. Moscow : Energia, 1977. 460 p. (Rus.)
7. Volchyn I.A., Raschepkin V.A. [Specific issues of

- Flue Gas Cleaning in Wet Venturi scrubbers at excess spraying]. *Energotehnologii i Resursoberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2018. No. 3. pp. 41–50. (Rus.)
8. Volchyn, V. Raschepkin, A. Iasynetskyi A. Flue Gas Dedusting in Venturi Scrubbers at Thermal Power Plants. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2018. 17 (11). pp. 2515–2525.
9. Shvydkiy V.S., Ladygichev M.G. [Gas Cleaning: A Reference Book]. Moscow : Teploenergetik, 2002. 640 p. (Rus.)
10. Ravi G., Gupta S.K., Viswanathan S., Ray M.B. Optimization of Venturi Scrubbers Using Genetic Algorithm. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. Vol. 41. pp. 2988–3002.
11. Costa M.A., Ribeiro A.P., Tognetti E.R., Aguiar M.L., Goncalves J.A.S., Coury J.R. Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Fine Powder from a Confined Gas Stream. *Materials Research*. 2005. 8 (2). pp. 177–179.
12. Nabil Rafidi, Fredrik Brogaard, Lei Chen, Rikard Håkansson, Ali Tabikh. CFD and experimental studies on capture of fine particles by liquid droplets in open spray towers. *Sustainable Environment Research*. 2018. No. 28. pp. 382–388.
13. Jinder Jow. Resource Utilization and Management of Fly Ash. *Cornerstone. The Official Journal of the World Coal Industry*. 2016. Vol. 4, Iss. 3. pp. 61–66.
14. Brogren C., Karlsson H.T. Modeling the absorption of SO₂ in a spray scrubber using the penetration theory. *Chem. Eng. Sci.* 1997. 52 (18). pp. 3085–3099.
15. Flagan R.C., Seinfeld J.H. Fundamentals of Air Pollution Engineering. — California Institute of Technology. PRENTICE HALL, 1988. 542 p.
16. Belousov V.V. [Theoretical bases of gas cleaning processes]. Moscow : Metallurgy, 1988. 256 p. (Rus.)
17. Volchyn I.A., Raschepkin V.A. [Mathematical modeling of the processes of fly ash particles coagulation with droplets in the Venturi tubes of TPP wet scrubbers]. *Energotehnologii i Resursoberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2012. No. 2. pp. 44–53. (Rus.)
18. Rudnick S.N., M. Koehler J.L., Martin K.P., Leith D., Cooper D.W. Particle Collection Efficiency in a Venturi Scrubber: Comparison of Experiments with Theory. *Environ. Sci. Technol.* 1986. 20 (3). pp. 237–242.
19. Calvert S., Lundgren D., Metha D.S. Venturi Scrubber Modelling. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 1972. Vol. 22. pp. 529–532.
20. Nigmatulin R.I. [Dynamics of multiphase media]. Moscow : Nauka, 1987. Vol. 1. 464 p. (Rus.)
21. Raschepkin V., Volchyn I. Simulation of the particulate matter removal process in a wet scrubber with a conical bottom at the excess liquid-to-gas ratios in the Venturi tube. *Abstracts: 6th International Congress “Sustainable Development: Protecting the Environment. Energy Saving. Balanced Nature Management»*. Lviv, September 23–25, 2020. Lviv: Western Ukrainian Consulting Center (ZUKC), Ltd., 2020. P. 23.

Received April 20, 2021