

УДК 628.511

Механізм уловлення пилу в трубах Вентурі та його моделювання за ймовірнісним методом

В. Б. Довгалюк¹, І. О. Пефтьєва²

¹к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 2280170@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4836-5354

²асп. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, ir.kachan14@gmail.com

Анотація. Визначення та оптимізація параметрів гідродинамічних і масообмінних процесів взаємодії газопилового потоку та зрошувальної рідини в трубах Вентурі є визначальним для забезпечення високої загальної ефективності очищення газів від пилу в скруберах. У статті описані процеси, що відбуваються під час очищення газу від пилу д труби Вентурі. Запропоновано деталізувати процеси взаємодії пилинок з рідиною в кожному елементі за довжиною труби Вентурі, а також у повітроводі за нею, акцентуючи увагу на найбільш значних її ділянках, за допомогою ймовірнісного методу моделювання масообмінних процесів; розглядати дифузори як місце продовження уловлювання пилу. Наведено формулу для розрахунку ефективності вловлювання пилу в дифузори, що підвищує точність розрахунків загальної ефективності пиловловлення у скруберах Вентурі. Якщо прийняти дифузор місцем продовження зустрічі, утримання та захоплення пилинок по всій його довжині, це дозволить врахувати велику кількість параметрів процесу в кожному елементі труби Вентурі, оцінити їх вплив на загальну ефективність пиловловлення, оптимізувати найбільш значущі показники, знизити опір труби Вентурі, заощадити витрату рідини і зменшити загальні експлуатаційні витрати на пилоочищення.

Ключові слова: очищення газів, труба Вентурі, крапля, пилинка, газорідний потік, ймовірність події, ефективність пиловловлення.

Вступ. Труби Вентурі, що широко використовуються для мокрого очищення газів від пилу, є простими за конструкцією та експлуатацією, швидкісними та високоефективними пристроями. Процес пилоочищення в них заснований на контакті пилинок та крапель розпиленої рідини з наступним збільшенням та уловлюванням конгломератів «крапля-пилинка». За таким, на перший погляд, простим поясненням, стоять багатостадійні та багаторазові повторні фізичні процеси взаємодії крапель та пилинок при їх русі крізь конфузори, горловину та дифузори труби Вентурі.

Актуальність дослідження. Розуміння ролі кожного конструктивного елементу та спроба опису процесів, що в них відбуваються, є актуальною та складною задачею, що не має однозначного вирішення.

Використання ймовірнісного підходу до оптимізації параметрів процесів та режимів у елементах труби Вентурі дозволить оцінити ступінь їхнього впливу на загальну ефективність пиловловлення, визначити конструктивні характеристики та розміри.

Відомі емпіричні методи розрахунку ефективності труб Вентурі не дозволяють у повній мірі і комплексно врахувати багатофакторність процесу уловлювання пилинок у єдиній формулі ефективності очищення [1, 2]. Складність та трудомісткість математичних розрахунків, що описують параметри фракційної ефективності

пиловловлювачів, зазвичай, пов'язані з необхідністю виконання розрахунків у декілька етапів, що призводить до неточностей та помилок. Можливості фізичного моделювання робочого процесу в трубах Вентурі та скруберах, що стоять за ними, вельми обмежений через те, що при дослідженні у широкому діапазоні зміни параметрів одночасне виконання рівностей основних критеріїв подібності не є можливим.

У зв'язку з вищевикладеними недоліками пропонується використати ймовірнісний підхід до опису процесу вловлювання в скруберах Вентурі. Цей метод дозволить обрати та врахувати найбільш впливові параметри та розробити математичну модель визначення ефективності та оптимізації параметрів пилоочищення в трубах Вентурі.

Формулювання цілей статті. Мета статті – запропонувати можливість використання ймовірнісного підходу до опису процесу уловлювання в трубах Вентурі, що дозволить обрати та врахувати найбільш впливові параметри, а також розробити математичну модель визначення ефективності та оптимізації параметрів пилоочищення.

Основна частина. Використання труб Вентурі для інтенсифікації мокрого пиловловлення зумовлено різноманітністю факторів, основними з яких є: можливість досягання високої загальної ефективності пилоочищення,

уловлювання дрібнодисперсного пилю, висока швидкість процесів, що відбуваються, простота конструкції, зручність обслуговування тощо. Ефективність уловлювання частинок у скрубєрі Вентурі більшою мірою визначається результатом взаємодії крапель з частинками пилю.

Послідовне з'єднання (рис.1) прямої ділянки труби та ділянок, що звужується та розширюється (конфузор, горловина, дифузор), дає можливість впливати на запилений газ та зрошувальну рідину, інтенсифікувати контакти пилин та крапель. Кожний елемент труби Вентурі виконує певну частину загального процесу пиловловлення.

У конфузєрі відбувається перетворення потенціальної енергії тиску газового потоку в кінетичну енергію руху. За рахунок поступової зміни перерізу за довжиною потік газу деформується, його швидкість збільшується, відбувається перехід від ламінарного режиму течії до турбулентного, а профіль швидкості поступово вирівнюється до рівномірно розподіленого. Спеціально підібраний кут звуження конфузєра дозволяє запобігти утворенню вихрової зони при вході в горловину та мінімізувати втрати тиску на деформації потоку. Основні витрати енергії в конфузєві пов'язані головним чином з витратами на тертя.

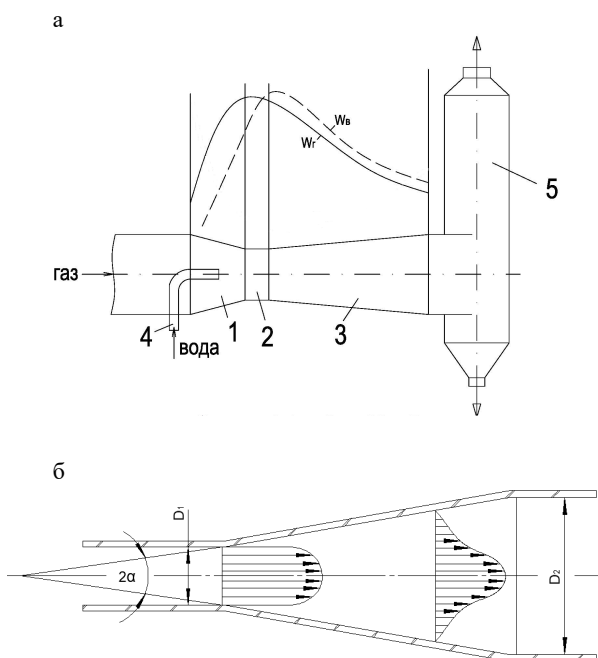


Рис.1 . Скрубєр з трубою Вентурі: а – принципова схема; б – зміна профілю швидкостей за довжиною труби: 1 – конфузєр; 2 – горловина; 3 – дифузєр; 4 – форсунка; 5 – краплєвловлювач; W_g – зміна швидкості рідини, м/с; W_g – зміна швидкості газу, м/с

На вході до прямої ділянки труби – горловину – потік рухається з максимальною швидкістю турбулентною течією, а градієнт тиску досягає максимального значення. У дифузєрі при рівномірному збільшенні перерізу відбувається перетворення кінетичної енергії потоку у потенційну, збільшення статичного тиску та зниження швидкості потоку, м/с, до значень, близьких до швидкості на вході в трубу Вентурі. Профіль швидкості в дифузєрі деформується з вираженим максимумом ближче до осі та помітним зниженням до стінок. Для підтримання мінімальних витрат енергії кут розширення дифузєра має бути таким, щоб підтримувалася безвідривна течія потоку при виході з горловини.

Як відомо, очищення газів від пилю в скрубєрах Вентурі засновано на попередній коагуляції пилових частинок та крапель зрошувальної рідини, що подається до труби Вентурі. Існують різні точки зору на оптимальний спосіб введення зрошувальної рідини.

Якщо прийняти за основу модель процесу осадження, запропоновану в [3], то для досягнення рівномірної густини зрошення рідину доцільно підводити до конфузєра на деякому віддаленні від горловини.

При русі газів у конфузєрі прискорення, що досягається за рахунок градієнту тиску, виявляється більшим ніж прискорення крапель у конфузєрі у співвідношенні густини рідини і газу $\rho_p / \rho_g \approx 10^3$. Велика різниця між швидкістю газів та рідини дозволяє розглядати процес як фільтрацію газів, що підлягають очищенню, крізь об'ємний дрібнозернистий фільтр, зернами якого є краплинки води. Дисперсність крапель під час руху конфузєром безперервно збільшується за рахунок подрібнення, що призводить до збільшення поверхні контакту між запиленими газами та рідиною.

У випадку використання форсунки, що розташована до конфузєра, де швидкість газу значно менша, а початкова швидкість крапель рідини більша, краплі рідини стикаються зі стінками конфузєра, що призводить до подрібнення крапель і рівномірному перекриттю перерізу труби Вентурі. З точки зору теорії кінематичної коагуляції [4] найбільша ефективність осадження настає при високих відносних швидкостях між пилинками в газі і краплями рідини, розпиленої в потік. Максимальна різниця швидкості досягається при введенні зрошування безпосередньо перед або в самій горловині труби Вентурі. Під дією високошвидкісного потоку газу краплі рідини піддаються повторному подрібненню (рис. 2).

Межу стійкості краплі можна визначати за значенням критерію Вебера, що характеризує співвідношення інерційних сил газового потоку до сил поверхневого натягу:

$$We = \rho_g \cdot w_g^2 \cdot d_k / 2\sigma_{ж}, \quad (1)$$

де $\sigma_{ж}$ - коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м; ρ_g - густина газу, кг/м³; w_g - швидкість газу відносно краплі, м/с; d_k - діаметр первісної краплі, м.

При $We > W_{кр}$ крапля втрачає стійкість та починає дрібнитися, а вплив на краплю потужних імпульсів тиску та швидкості призводить до вибухового подрібнення (рис. 2). На вході у горловину, коли відносна швидкість газу і краплі досягає 100 м/с і більше, значення $W_{кр}$ потрапляє в діапазон $10^3 \leq W_{кр} \leq 10^5$, що характеризує режим дії газового потоку на краплю, за якого відбувається вибухове подрібнення первісних (після форсунки) крапель на безліч дрібних [5].

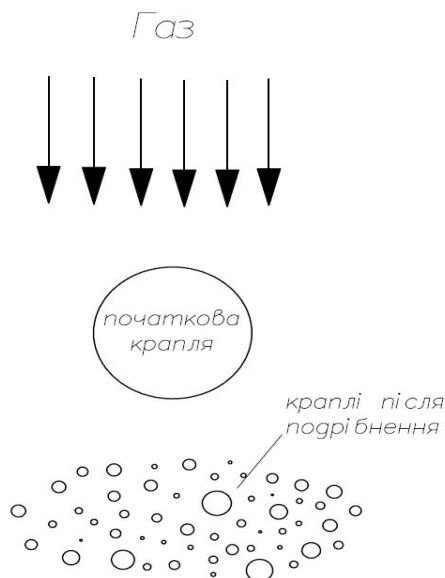


Рис. 2. Вибухове подрібнення краплі газовим потоком

Ефективність захоплення дуже дрібних пилинок в трубі Вентурі зростає з ростом швидкості газів у горловині, зменшенням розміру крапель і збільшенням питомого зрошення. Оптимальне співвідношення між швидкістю газів у горловині труби і значенням питомого зрошення специфічно для кожного пилу і залежить від його дисперсного складу. Так, при уловлюванні пилинок, розміри яких менше 0,1 мкм, велике значення набуває тривалість контакту запиленних газів з поверхнею диспергової рідини. Згідно з дослідженнями [6],

захоплення частинок краплями відбувається не тільки в самій горловині, але триває і в дифузорі, на відстані від горловини, що перевищує 10-кратний діаметр останньої.

У дифузорі швидкість крапель починає перевищувати швидкість газу. Краплі наздоганяють і вловлюють вільні порошинки, стикаються і зливаються з більш дрібними краплями, які вже утримують пилінки. Відбувається збільшення крапель з уловленими частками до розмірів, за яких вони легко можуть бути виведені з потоку в інерційному краплєвловлювачі.

Крім вищевикладених і описаних процесів взаємодії пилинок з краплями, осадження частинок з потоку відбувається і на тонку плівку змочених поверхонь конфузора, горловини і дифузора [7]. Турбулентний режим руху і турбулентні пульсації в трубі Вентурі є важливим фактором інтенсифікації пиловловлювання. Швидкість пульсацій з наближенням до стінки зростає і починає спадати на дуже малій відстані від неї. Тому, незважаючи на повне захоплення частинок турбулентним потоком в центральній частині, поблизу стінок на них можуть впливати значні інерційні сили, що сприяють їхньому осадженню. Однак через складність моделювання й опису інерційного осадження частинок на стінках з турбулентного потоку, зручні до застосування розрахункові залежності відсутні.

Якщо застосувати ймовірнісний метод моделювання масообмінних процесів [8, 9], то це дозволить деталізувати процеси взаємодії пилинок з рідиною в кожному елементі труби Вентурі, акцентуючи увагу на найбільш значних на конкретній ділянці.

Наприклад, дифузор слід розглядати, як і горловину, місцем продовження зустрічі, зіткнення, утримання та захоплення пилинок краплями у всій його довжині, але при зниженій швидкості, збільшеному часі контактів частинок, зниженні ступеня турбулізації потоку, з урахуванням плівкового режиму течії рідини на стінках. Ефективність пиловловлювання буде залежати від довжини дифузора і кута його розкриття. Якщо розділити дифузор за довжиною на умовні ділянки, то загальна ефективність розраховується шляхом додавання ефективності на кожній ділянці за формулою:

$$E_{заг} = \sum_{i=1}^n r_i, \quad (2)$$

де n - кількість елементарних ділянок дифу-

зора з різним перерізом та швидкістю потоку;
 i – поточний номер ділянки; r_i – імовірність уловлювання пилу на ділянці.

За дифузором у звичайному трубопроводі можливе подальше вловлювання пилинок краплями, якщо це вловлювання не відбулося в дифузорі. Його теж можна врахувати як додаткову $n + 1$ ділянку від дифузора до краплєвловлювача.

Висновки. Якщо прийняти дифузор місцем продовження зустрічі, утримання та захоплення пилинок за всією його довжиною, це дозволить врахувати велику кількість параметрів процесу в кожному елементі труби Вентурі, оцінити їхній вплив на загальну ефективність пило-вловлення, оптимізувати найбільш значущі показники, знизити опір труби Вентурі, заощадити витрату рідини і зменшити загальні експлуатаційні витрати на пилоочищення.

Литература

1. Дубинская Ф. Е. Скрубберы Вентури. Выбор, расчёт, применение / Ф. Е. Дубинская, Г. К. Лебедюк. – Москва: ЦИНТИхимнефтемаш, 1977. – 61 с.
2. Теверовский Б. З. Очистка газов в чёрной металлургии / Б. З. Теверовский. – Днепропетровск: Проминь, 1971. – 91 с.
3. Русанов А. А. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике / А. А. Русанов, И. И. Урбах, А. П. Анастасиади. – Москва: «Энергия», 1969. – 456 с.
4. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – Москва: Изд. АН СССР, 1952 – 538с.
5. Пажи Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – Москва: Химия, 1984. – 256с.
6. Ужов В. Н. Очистка газов мокрыми фильтрами / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – Москва: Химия, 1972. – 248с.
7. Дергачёв Н. Ф. Мокрые золоуловители системы ВТИ / Н. Ф. Дергачёв. – Москва: Госэнергоиздат, 1960. – 96с.
8. Довгалюк В. Б. / Імовірнісна блок-схема моделювання процесу пилоочищення газів в скруберах Вентурі / В. Б. Довгалюк, І. О. Качан // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2016. – Вип. 17. – с. 131-136
9. Качан В. Н. Теоретические основы очистки воздуха / В. Н. Качан, А. Г. Акинина. – Макеевка: ДонГАСА, 2001. – 130 с.

References

1. Dubinskaya F. E., Lebedyuk G. K. *Skrubbery Venturi. Vybory, raschoty, primeneniye*. TSINTIkhimneftemash, 1977.
2. Teverovskii B. Z. *Ochistka gazov v chornoj metallurgii*. Promin, 1971.
3. Rusanov A. A., Urbakh I. I., Anastasiadi A. P. *Ochistka dymovykh gazov v promyshlennoi energetike*, «Energiya», 1969.
4. Levich V. G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika*, Izd. AN SSSR, 1952.
5. Pazhi D. G., Galustov V. S. *Osnovy tekhniki raspylivaniia zhidkosti*. Khimiya, 1984.
6. Uzhov V. N., Valdbereg A.Yu. *Ochistka gazov mokrymi filtrami*. Khimiya, 1972.
7. Dergachev N. F. *Mokrye zolouloviteli sistemy VTI*. Gosenergoizdat, 1960.
8. Dovgaliuk V. B., Kachan I. O. “Imovirnisna blok-skema modeliuвання protsesu pyloochishchennia gaziv v skruberakh Venturi.” *Ventyliatsiia, osvittleniia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 17, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2016, pp. 131-136.
9. Kachan V. N. *Teoreticheskie osnovy ochistki vozdukh*. DonGASA, 2001.

УДК 628.511

Механизм улавливания пыли в трубах Вентури и его моделирование по вероятностному методу

В.Б.Довгалюк¹, И. А. Пефтева²

¹д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, tgsiv@ukr.net

²асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, ir.kachan14@gmail.com

Аннотация. Определение и оптимизация параметров гидродинамических и массообменных процессов взаимодействия газопылевого потока и оросительной воды в трубах Вентури является определяющим для обеспечения высокой общей эффективности очистки газов от пыли в скрубберах. В статье описаны процессы, происходящие во время очистки газа от пыли в трубе Вентури. Предложено детализировать процессы взаимодействия пылинок с жидкостью в каждом элементе по длине трубы Вентури, а также в воздуховоде за ней, акцентируя внимание на наиболее значительных её участках, с помощью вероятностного метода моделирования массообменных процессов; рассматривать диффузор как место продолжения улавливания пыли. Приведена формула для расчёта эффективности улавливания пыли в диффузоре, что повышает точность расчётов общей эффективности пылеулавливания в скрубберах Вентури. Если принять диффузор местом продолжения встречи, удержания и увлечения пылинок по всей его длине, это позволит учесть большое количество параметров процесса в каждом элементе трубы Вентури, оценить их влияние на общую эффективность пылеулавливания, оптимизировать наиболее значимые показатели, снизить сопротивление трубы Вентури, сэкономить расход жидкости и уменьшить общие эксплуатационные расходы на пылеочистку.

Ключевые слова: очистка газов, труба Вентури, капля, пылинка, газожидкостный поток, эффективность пылеулавливания.

UDC 628.511

The Mechanism of Dust Trapping in Venturi Pipes and its Simulation by the Probabilistic Method

V. Dovgalyuk¹, I. Peftewa²

¹PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, tgsiv@ukr.net

²Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, ir.kachan14@gmail.com

Abstract. Venturi pipes, widely used for wet cleaning of dust gases, are simple in design and operation, high-speed and high-performance devices. The process of dust cleaning in them is based on the contact of dust and droplets of the spray liquid with the subsequent increase and capture of "droplet-speak" conglomerates. For this, at first glance, a simple explanation, there are multistage and repeated physical processes of the interaction of droplets and dust when moving through the conduit, the neck and the diffuser of the Venturi pipe. Determination and optimization of parameters of hydrodynamic and mass-exchange processes of interaction of the gas-dust flow and irrigation fluid in the Venturi pipes is crucial for ensuring high overall efficiency of cleaning gases from dust in scrubbers. The article describes the processes that occur when cleaning gas from dust in the Venturi pipe. It is proposed to elaborate the processes of interaction of the dust with the liquid in each element along the length of the Venturi pipe, as well as in the air pipe behind it, focusing on the most significant sections of it, using the probabilistic method of mass transfer processes simulation, consider the diffuser as a place for the continuation of dust capture. The formula for calculating the efficiency of dust capture in a diffuser is presented, which increases the accuracy of calculations of the total efficiency of dust extraction in the Venturi scrubbers. If the diffuser receives a place for the continuation of the meeting, the holding and moving of the specks throughout its length, this will allow for taking into account the large number of process parameters in each element of the Venturi pipe, assess their impact on the overall efficiency of dust extraction, optimize the most significant parameters, reduce the resistance of the Venturi pipe, save liquid flow and reduce overall operating costs for dust removal.

Keywords: gas purification, Venturi pipe, drop, dust, gas-liquid flow, dust purification efficiency.

Надійшла до редакції / Received 16.05.2018.