



2024

НАУКОВІ ПРАЦІ

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 30 № 3

*Журнал
«Наукові праці Національного університету харчових технологій»
видається з 1938 року*

КИЇВ ✦ НУХТ ✦ 2024

OPTIMIZATION OF LIQUID SUPPLY NODES DESIGN IN VENTURI SCRUBBERS BASED ON CFD INVESTIGATIONS

V. Ponomarenko, D. Liulka, R. Yakobchuk, A. Slyusenko, S. Lementar, Ya. Khitriy, I. Tymchenko
National University of Food Technologies

Key words:

*CFD modeling
Venturi scrubber
Dust collection
Hydrodynamics
Nozzle*

Article history:

Received 10.05.2024
Received in revised form
27.05.2024
Accepted 08.07.2024

Corresponding author:

V. Ponomarenko

E-mail:

vponomarenkov@ukr.net

Citation: Пономаренко В. В., Люлька Д. М., Якобчук Р. Л., Слюсенко А. М., Лементар С. Ю., Хитрий Я. С., Тимченко І. В. (2024). Оптимізація конструкції вузлів підведення рідини в скруббер Вентурі на основі CFD досліджень. *Наукові праці НУХТ*, 30(3), 101—116.
DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-3-10

ABSTRACT

In food industry processes related to drying, grinding, etc., dust is generated, posing sanitary, environmental, and technological problems: negative impact on human health, environmental pollution, and loss of valuable raw materials with the dust. Solution of these problems depends on comprehensive improvement of dust collection equipment operation. One of the primary and effective elements of such equipment is the Venturi scrubber.

The aim of this work is to determine the rational design of nozzles for axial distribution of liquid at the scrubber inlet and peripheral supply through holes in the throat to ensure minimal and sufficient wetting density. This will allow maximal wetting of dust particles and their subsequent removal.

To achieve this goal, computational fluid dynamics (CFD) methods implemented in the ANSYS CFX software package were used. The operation of nozzles of three types was investigated: jet, centrifugal-jet, and centrifugal. Their three-dimensional models were developed, and according to the generally accepted research algorithm, a methodology for adjusting the program modules to implement this task was provided. The specifics of module adjustment when studying scrubbers with different structural designs of liquid supply nodes were presented in solving the problem of rational design of liquid supply nodes in the scrubber.

The results of calculations allowed selecting centrifugal-jet nozzles placed along the axis of the scrubber to wet its throat as an efficient option. Uniform distribution of liquid across the cross-section and length is possible to reduce liquid consumption by half. Investigation of the structural design of peripheral liquid supply showed that placing inlet holes in the middle of the throat was not rational, as zones of vortex flows occurred along the inlet edges of the throat, and concentration equalization of liquid occurred at its outlet. A more rational option for peripheral liquid supply was its supply through holes made in the throat at a distance of 0.1...0.2 from its beginning.

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛІВ ПІДВЕДЕННЯ РІДИНИ В СКРУБЕР ВЕНТУРІ НА ОСНОВІ CFD ДОСЛІДЖЕНЬ

В. В. Пономаренко, Д. М. Люлька, Р. Л. Якобчук, А. М. Слюсенко,
С. Ю. Лементар, Я. С. Хитрий, І. В. Тимченко
Національний університет харчових технологій

У процесах харчової промисловості, пов'язаних із сушінням, подрібнення тощо, утворюється пил, що створює проблеми санітарного, екологічного й технологічного характеру (негативний вплив на здоров'я людини, забруднення навколишнього середовища та втрата цінної сировини із пилом). Вирішення цих проблем залежить від комплексного вдосконалення роботи пилоочисного обладнання. Одним з основних та ефективних елементів такого обладнання є скрубер Вентури.

Метою дослідження є визначення раціональної конструкції форсунок для осьового розподілення рідини на вході в скрубери і периферійного її підводу через отвори в горловині для забезпечення мінімальної та достатньої густини зрошення. Це дасть змогу максимально змочити пилові частинки та в подальшому їх виділити.

Для досягнення поставленої мети використано методи обчислювальної гідродинаміки (CFD), реалізовані в програмному пакеті ANSYS CFX. Досліджено роботу форсунок трьох типів: струминної, відцентрово-струминної та відцентрової. Розроблено їх тривимірні моделі і згідно із загальноприйнятим алгоритмом досліджень приведено методіку налаштування модулів програми для реалізації цього завдання. Особливості налаштування модулів при дослідженні скрубера з різним конструктивним виконанням вузлів підводу рідини описані при вирішенні задачі раціонального конструктивного виконання вузлів підводу рідини в скрубери.

Отримані результати числових розрахунків дали змогу вибрати відцентрово-струминні форсунки, розміщені по осі скрубера для зрошення його горловини, як ефективний варіант. Рівномірний розподіл рідини по поперечному перерізу та по довжині можливий для зменшення витрати рідини вдвічі. Дослідження конструктивного виконання периферійного підведення рідини показали, що виконання підвідних отворів посередині горловини не є раціональним, оскільки вздовж вхідних кромок горловини виникають зони вихрових течій, а вирівнювання концентрації рідини відбувається на її виході. Більш раціональним варіантом периферійного підведення рідини є її підведення через отвори, що виконані в горловині на відстані $0,1 \dots 0,2$ від її початку.

Ключові слова: CFD-моделювання, скрубери Вентури, пиловловлювання, гідродинаміка, форсунка.

Постановка проблеми. У цукровій промисловості для сушіння цукру переважно використовуються двобарабанні сушильно-охолоджувальні установки, в які подається сушильний або охолоджувальний агент протитоком. Також відомі

сушарки з псевдозрідженим станом і віброустановки. У всіх випадках відбувається рух кристалів цукру, що спричиняє їх взаємодію з обладнанням та один з одним, призводячи до подрібнення й утворення пилу. Кристали втрачають якість через співударя, що спричиняє помутніння граней.

Під час транспортування висушеного й охолодженого цукру, пересипання з одного транспортера на інший та потрапляння в бункер продовжуються процеси пилоутворення. Враховуючи значні об'єми повітря, використовувані для сушіння цукру, сумарна потужність цих пиловиділень у загальному балансі аерозольних забруднень атмосфери становить помітну величину. Пилові викиди є небезпечними через можливість вибуху, отруєння та розвиток професійних захворювань, а також мають негативний вплив на навколишнє середовище.

Згідно з типовою технологічною схемою, сушильні й охолоджувальні агенти та аспіраційні викиди обов'язково підлягають очищенню. Проте втрата цукру разом з викидами повітря в атмосферу становить від 0,1% до 0,4% від його виробництва (Mahniuk et al., 2018).

Небезпечність цукрового пилу в пожежному відношенні визначається його високою концентрацією. Мінімальна концентрація пилу в повітрі, необхідна для вибуху, складає 8,9 г/м³ (Kuracina et al., 2018).

Боротьба з пиловиділенням пов'язана з вирішенням низки завдань, включаючи максимальне підвищення ефективності пиловловлюючого обладнання. Вибір відповідного типу пиловловлювача вирішується ретельним вибором, що забезпечить нормовану очистку викидів, високу надійність та економічність. Таке досягнення можливе завдяки комплексу експериментальних і комп'ютерних досліджень процесів на всіх етапах розроблення обладнання, що дає змогу оптимізувати його конструкцію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні потоки цукрового пилу утворюються в сушарках та під час перевантаження на будь-яких пристроях на шляху до бункерів зберігання, а також під час завантаження в сам бункер. Після центрифугування температура цукру-піску становить 60—70 °С, а вологість — 0,5%. Після сушіння температура повинна бути 20—25 °С, а вологість — 0,03—0,05% при безтартному зберіганні (волога знаходиться на кристалах цукру в плівці). Такі параметри обумовлюють вибір сушарок в Україні, переважно барабанного типу з різноманітними насадками всередині. Аналогічні сушарки використовуються також на деяких заводах Європейського Союзу (Asadi et al., 2006).

Цукор лопатками, які нерухомо прикріплені до обертаючого барабана, піднімається на певну висоту та зсипається вниз, контактуючи із сушильним агентом. При падінні з висоти кристали цукру взаємодіють з внутрішніми елементами сушарки та між собою, що спричиняє подрібнення й утворення пилу всередині сушарки з концентрацією 70—130 мг/м³.

Утворення пилу спостерігається також у місцях перевантаження цукру на транспортери (концентрація цукрового пилу 61—90 мг/м³) та завантаження в силос (концентрація пилу досягає значень 194—290 мг/м³) (Thorpe et al., 1985).

Сушильний агент та аспіраційні відсоси очищаються від цукрового пилу в пилеочисниках різних конструкцій (Bulygin et al., 2018), після чого викидаються в

атмосферу. Робота аспіраційного обладнання характеризується ступенем вловлювання пилу на рівні 80—90%, залежно від типу встановленого обладнання (Malmi et al., 2014). Головним чином використовується мокрий спосіб очищення, який передбачає подачу рідини в активну зону.

Також застосовують комбіновані методи очищення повітря: спочатку цукровий пил вловлюється в циклонах, а потім застосовується мокрий спосіб для остаточного очищення (Ali et al., 2013).

Ефективність вловлювання пилу мокрим способом залежить від ефективної роботи кожної одиниці обладнання очисної установки (Озарків et al., 2016). При очищенні великих об'ємів газу, зазвичай, його подають знизу в циліндричну ємність, в якій різноманітними способами по поперечному перерізу розподіляється рідина. Такий метод є енергозатратним, оскільки рівномірно розподілити рідину проблематично. Застосовують як гравітаційне розподілення рідини, так і її розпилення кількома форсунками.

У першому випадку краплі рідини великі (кілька міліметрів). При достатньо високому ступені зрошення з урахуванням прямолінійності траєкторій крапель ефективність зіткнень частинок пилу з ними невелика. Таке обладнання має невисокий ступінь вловлювання пилу.

Заміна пристроїв гравітаційного розподілення рідини на гідравлічний спосіб розпилення за допомогою форсунок дає змогу отримати мілкофракційний склад крапель рідини, а отже, більш рівномірно розподілити її по поперечному перерізу (Пономаренко et al., 2015; Жао et al., 2012). При розміщенні кількох форсунок необхідно вирішити такі завдання:

- визначити конструкцію форсунки, що відповідає вимогам енергоефективності та забезпечує дрібнодисперсний склад крапель по поперечному перерізу факела розпилення;

- виконати оптимальне розміщення форсунок в обладнанні для отримання необхідного та достатнього ступеня зрошення при забезпеченні рівномірності розподілення рідини по його поперечному перерізу.

Для забезпечення зазначених умов необхідно диспергувати достатньо великі об'єми рідини, що само по собі є енергозатратним. Тому більш доцільним при вловлюванні пилу є зволоження запиленого газу безпосередньо в трубопроводі при його підводі в пиловловлювач шляхом встановлення форсунки або ежектора рідини периферійною зоною. Такий принцип використовується в скруберах Вентурі (Husted et al., 2009), які забезпечують високу ефективність очищення аерозолів від частинок середнього розміру 1...2 мкм із початковою концентрацією домішок до 100 г/м³ та є одним з найефективніших елементів обладнання в установці вловлювання пилу.

Круглі скрубери Вентурі застосовують за витрат газу до 80000 м³/год. За більших витрат і більших розмірів труби можливості рівномірного розподілу зрошувальної рідини поперечним перерізом труби погіршуються, тому застосовують декілька паралельно працюючих круглих труб або труби прямокутного перерізу.

У конфузори газ розганяється від вхідної швидкості 15...20 м/с до швидкості 30...200 м/с у вузькому перерізі. Процес осадження частинок пилу на краплях рідини забезпечується розвинутою поверхнею крапель, високою відносною швид-

кістю руху частинок рідини і пилу в конфузорі. Питомі витрати води на зрошення — $0,1 \dots 6 \text{ дм}^3/\text{м}^3$. Ефективність пиловловлювання у скруберах підвищується зі збільшенням швидкості газів у горловині щільності зрошення (Ali et al., 2017).

Оптимальне співвідношення швидкості газів у горловині труби і щільності зрошення визначають для кожного виду пилу; воно залежить від його дисперсного складу. При вловлюванні частинок пилу, розміри яких менше $0,1 \text{ мкм}$, великого значення набуває тривалість контакту запиленого газу з поверхнею диспергованої рідини. У цьому разі підвищення ефективності досягається за рахунок зниження швидкості газів до 50 м/с і збільшення щільності зрошення (Kuracina et al., 2018).

Залежно від способу підводу зрошувальної рідини в скрубери Вентурі розрізняють такі типи апаратів: із центральним підведенням рідини в конфузори, з периферійним зрошенням (у конфузорі та/або в горловині), з плівковим зрошенням, із безфорсунковим та форсунковим зрошенням.

У скрубери Вентурі повинно бути забезпечено максимальну ефективність змочування пилових частинок, що прямо залежить від рівномірності розподілення рідини по поперечному перерізу конфузора та горловині труби Вентурі. Однак вибору схеми підводу рідини, безпосередньо вибору типу форсунок і конструктивному виконанню приділяється недостатньо уваги (Plaza et al., 2014). Конструктивні прорахунки знижують ефективність роботи обладнання при високих витратах рідини, що збільшує відносну вартість очищення.

Для розділення суміші (рідини від повітря) після скрубера Вентурі застосовують в основному відцентровий спосіб розділення в циклонах різного типу. Циклони за більш ніж столітню історію свого існування є одними з найбільш розповсюджених апаратів як для вловлювання пилу, так і в випадках розділення фаз. Ефективність вловлювання твердих частинок в них досягає $99,6\%$. Їх перевагами є висока ефективність очищення, низькі енергозатрати та простота конструкції. До недоліків відносять недостатньо високий ступінь очищення пилу з розмірами частинок менше 10 мкм (Ali et al., 2013; Tomaszewski et al., 2020), тому застосування тільки циклонів при сухому способі очищення сушильного агента від цукрового пилу недостатнє. Рідина, яка використовується для очищення повітря від пилу, направляється для повторного уварювання для отримання кристалічного цукру.

Якісно очистити повітря сухим способом від пилу можна при застосуванні волокнистих фільтрів або електрофільтрів. Однак самі фільтрувальні установки займають достатньо велике місце в цеху, потребують додаткового обслуговування. Якщо є загроза вибуху, то електрофільтри використовувати заборонено.

Мета статті: дослідження впливу конструктивного виконання системи підведення рідини на рівномірність її розподілення по поперечному перерізу труби Вентурі.

Матеріали і методи. Для покращення ефективності аспірації повітря та зменшення навантаження на пилоочисне обладнання, зокрема циклони, необхідно забезпечити оптимальну роботу скрубера Вентурі. Для вирішення поставленого завдання необхідно провести дослідження впливу конструктивного виконання системи підведення рідини на рівномірність її розподілення по поперечному пере-

різу труби Вентурі. Пропонується використовувати методи обчислювальної гідродинаміки (CFD), реалізовані у програмному пакеті ANSYS CFX. Дослідження складається з двох етапів: перший — вивчення факела розпиленої рідини з різноманітними конструкціями форсунок для вибору найбільш раціонального розпилювача для подальшого використання у скрубєрі Вентурі; другий — аналіз течії потоків у трубі Вентурі для визначення оптимального конструктивного виконання системи підведення рідини в скрубєр.

Традиційно у скрубєрі Вентурі підведення рідини здійснюється або периферійно, або через форсунку, що встановлена по його осі. Для визначення раціонального типу форсунки, який забезпечить рівномірне розподілення рідини по поперечному перерізу факела, і відповідно, дасть змогу досягти найкращого зволоження частинок, було обрано три типи форсунок (рис. 1): струминну, відцентрово-струминну та відцентрову. На прикладі відцентрово-струминної форсунки відмітимо дії, які були виконані для моделювання гідродинаміки факела розпилення форсунок.

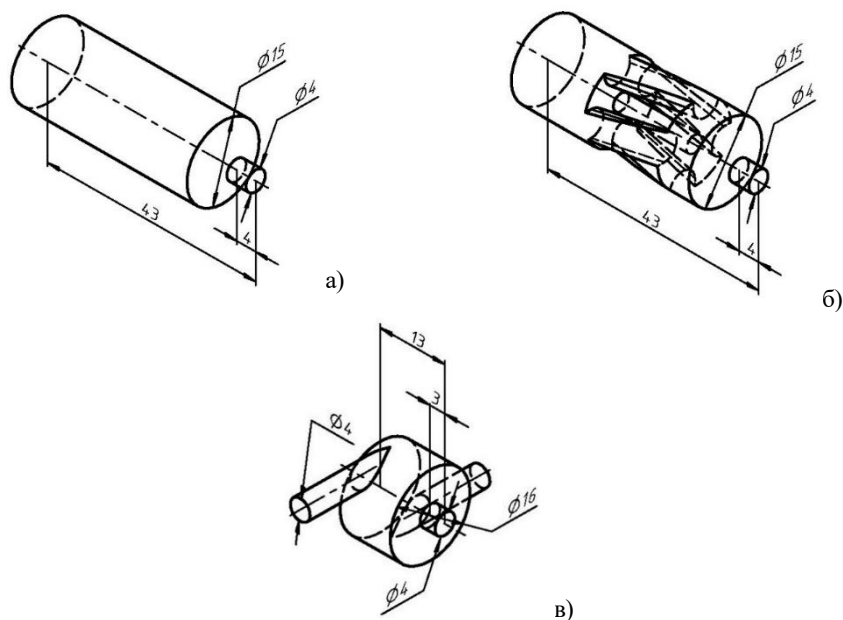


Рис. 1. Моделі досліджуваних форсунок: а — струминна форсунка; б — відцентрово-струминна форсунка; в — відцентрова форсунка

Для проведення CFD-дослідження було створено твердотільну розрахункову область, що включає в себе форсунку та зону для моделювання факела розпилення (рис. 2). Розроблена розрахункова сітка складається з тетраїдальних комірок із середнім розміром ребра 4 мм.

Основні параметри розрахунку включають:

- тип задачі визначено як нестационарна («Transient»);
- встановлено тривалість розрахунку («Total Time») на рівні 0,5 секунди та часовий крок («Timesteps») 0,001 секунди;

- робочі середовища — вода та повітря, з атмосферним тиском 101325 Па та температурою 25 °С;

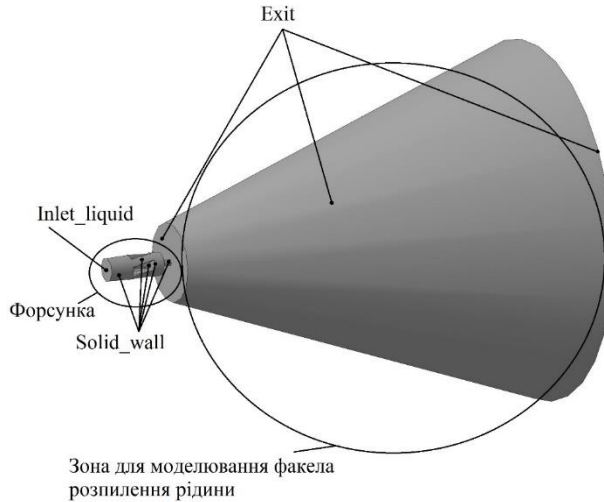


Рис. 2. Розрахункова область та поверхні, до яких прикладаються граничні умови

- враховано прискорення вільного падіння, коефіцієнт поверхневого натягу води та коефіцієнт опору краплі в газовому середовищі ($Cd = 0,44$);
- для врахування турбулентності потоку використано модель $k-\epsilon$, яка забезпечує компроміс між точністю результатів, тривалістю розрахунку та вимогами до розрахункової сітки;
- моделлю є двофазна система з інтенсивним обміном енергії та маси між середовищами, використано модель Ейлера «Mixture».

Задано початкові умови: нульова швидкість, атмосферний тиск та об'ємна частка повітря рівна 1 (100%) по всій розрахунковій області.

Граничні умови включають вхід рідини у форсунку («Inlet_liquid»), стінку форсунки («Solid_wall») та вихід («Exit»). Масова витрата рідини складає 0,2 кг/с.

Для граничної умови «Solid_wall» використано тип «Wall» (тверда стінка) та параметр «No-slip wall». Для граничної умови «Exit» використано тип «Opening» та встановлено атмосферний тиск. Початково в цій зоні міститься лише повітря, і його об'ємна частка становить 1, води — 0. Критерій збіжності результатів встановлено на рівні 0,0001.

У контексті моделювання гідродинаміки потоків у скрубєрі Вентурі розглянуто три варіанти підведення рідини (рис. 3): периферійне через отвори в конфузорі та горловині труби Вентурі (рис. 3, а), центральне через форсунку (рис. 3, б), комбіноване — через форсунку та отвори в конфузорі та горловині труби Вентурі (рис. 3, в).

На прикладі скрубєра Вентурі з периферійним підведенням рідини відмітимо дії, які були виконані для моделювання гідродинаміки потоків у всіх скрубєрах.

Створено тривимірну твердотільну модель скрубера Вентурі (рис. 4) та визначено розрахункову сітку, яка складається з тетраїдальних комірок із середнім розміром ребра 4 мм.

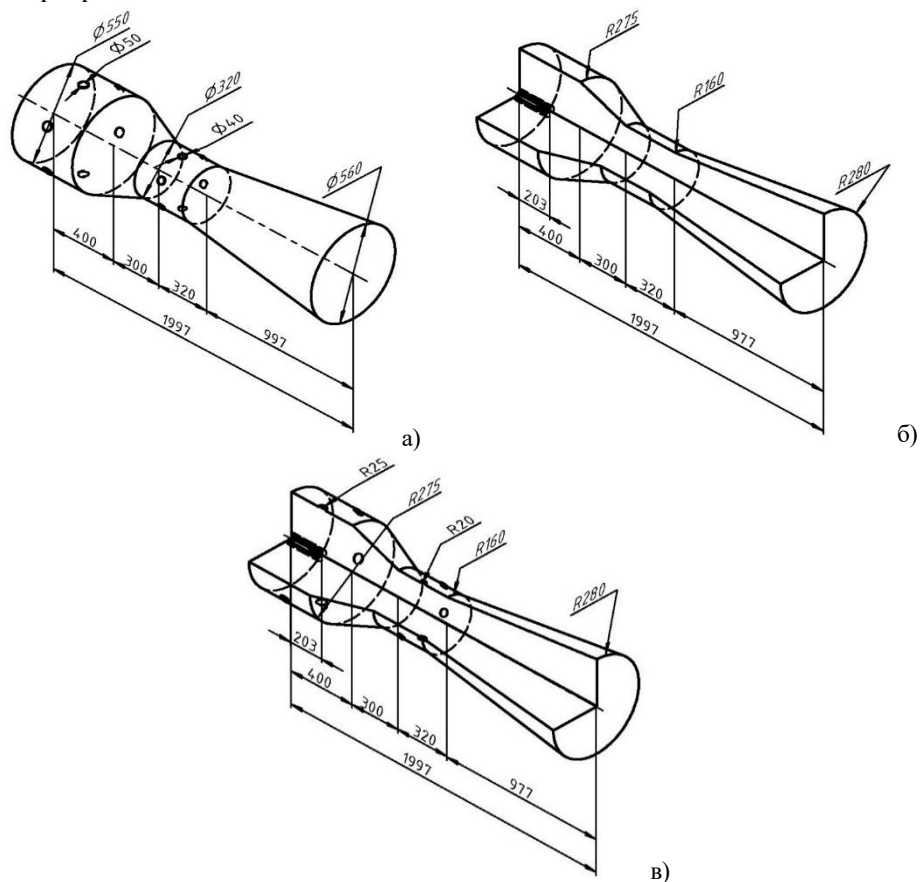


Рис. 3. Моделі досліджуваних труб Вентурі: а — периферійне підведення рідини; б — підведення рідини через форсунку; в — комбіноване підведення рідини

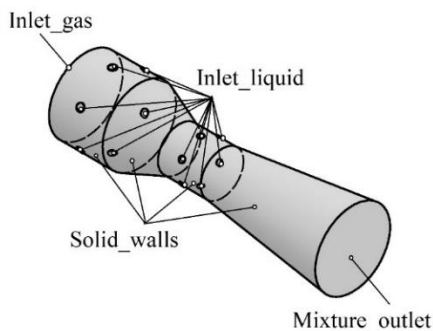


Рис. 4. Розрахункова область і поверхні, до яких прикладаються граничні умови

Налаштування для моделювання скрубера Вентурі аналогічні тим, що використовувалися для моделювання форсунки, з незначними відмінностями в граничних умовах.

При моделюванні розглядається робота скруберів Вентурі для очищення $16,000 \text{ м}^3/\text{год}$ запиленого повітря, що відповідає продуктивності типового скрубера для цукрового виробництва (Khadra et al., 2022). Витрата рідини прийнята з розрахунку $0,5 \text{ л}$ води на оброблення 1 м^3 газу.

Гранична умова «Inlet_gas» вибрана як «Inlet» з масовою витратою газу 5 кг/с . Параметри моделі турбулентності для граничної умови «Inlet_gas»: $k = 0,05$, $\varepsilon = 10$. Об'ємна частка води для цієї умови дорівнює 0 , для повітря — 1 .

Гранична умова «Inlet_liquid» представляє вхід рідини у скрубер. При моделюванні роботи скруберів Вентурі з периферійним підведенням рідини та центральним через форсунку витрата рідини складала $1,67 \text{ кг/с}$, а при комбінованому підведенні (периферійне та центральне) по $0,835 \text{ кг/с}$ через форсунку і периферійні підвідні патрубки.

Гранична умова «Mixture_outlet» вибрана як «Outlet». Для граничної умови «Solid_walls» обрано тип умови «Wall» з параметром «No-slip wall».

Результати і обговорення. Аналіз результатів комп'ютерного дослідження форсунки струминного типу, яке виконано за допомогою CFD ANSYS моделювання, надає можливість отримати важливі якісні та кількісні характеристики факела розпилення. Це ключовий етап у визначенні оптимального конструювання обладнання для досягнення ефективної роботи при мінімальних часових і матеріальних витратах.

На рис. 5 представлений контур об'ємної частки рідини по довжині факела розпилення при витраті $0,2 \text{ кг/с}$. Ця візуалізація дає змогу оцінити розподіл рідини в просторі та визначити, наскільки ефективно форсунка розпилює рідину.

Аналізуючи факел розпилення струминної форсунки, слід зазначити, що він відзначається невеликим кутом розширення та диспергуванням крапель рідини на значній відстані від сопла форсунки.

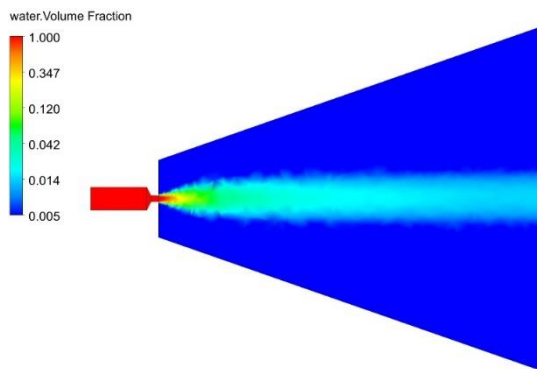


Рис. 5. Розподілення рідини по довжині факела розпилення струминної форсунки

На рис. 6 представлено розподілення рідини у факелі розпилення відцентрової форсунки при тій самій витраті $0,2 \text{ кг/с}$.

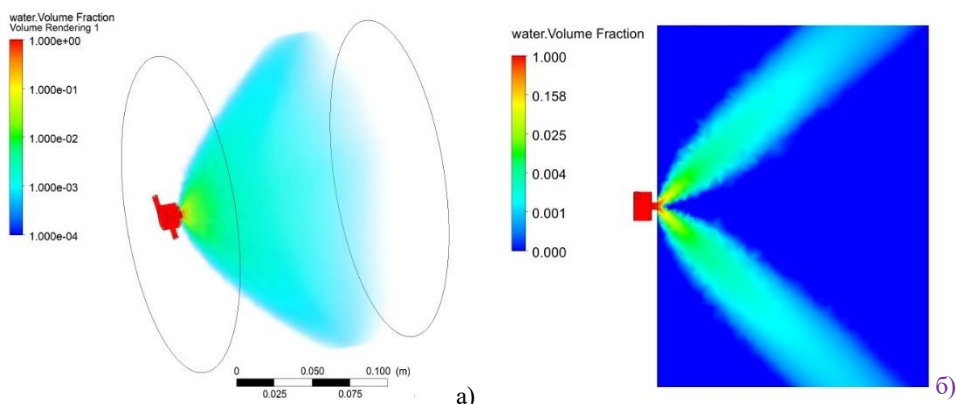


Рис. 6. Розподілення рідини у факелі розпилення відцентрової форсунки: а — по довжині; б — у поперечному перерізі

Факел розпилення відцентрової форсунки має кут розширення приблизно 90° , диспергування крапель відбувається на малій відстані від сопла. Центральна частина факела розпилення майже не заповнена краплями рідини, що породжує сумніви щодо доцільності її встановлення в пилоочисному обладнанні через обмежений час контакту із запиленим повітрям.

Аналогічні дослідження проведено для відцентрово-струминної форсунки, а результати розподілення об'ємної частки рідини по довжині факела розпилення представлені на рис. 7.

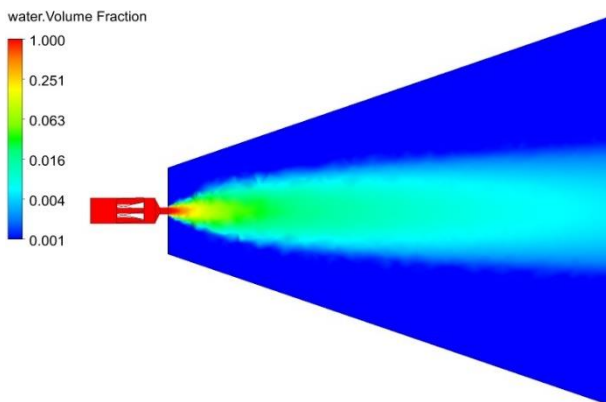


Рис. 7. Контур об'ємної частки рідини для відцентрово-струминної форсунки

Запропоновані результати однозначно підтверджують переваги відцентрово-струминних форсунок, оскільки лише вони забезпечують рівномірне розподілення крапель рідини по поперечному перерізу факела розпилення та належний кут розпилення. Ці переваги дають змогу однорідно розподілити рідину по поперечному перерізу обладнання, уникнувши областей застою та «проскоку» газової фази.

Але представлені дослідження не будуть повними, якщо не розглядати роботу пилоочисного обладнання як одного цілого. Оскільки за основу прийнятий

скрубер Вентурі, проведемо моделювання, що дає змогу отримати картину розподілення рідкої фази по поперечному перерізу та по його довжині. Це надасть можливість попередньо оцінити ефективність вловлювання пилових частинок, оскільки найбільш досконала система розподілення рідини сприяє більш повному змочуванню пилових частинок, а отже, і видаленню їх з пилового потоку внаслідок збільшення їх інерційної складової.

Оскільки відомі скрубери Вентурі з різними варіантами підводу рідини, проаналізуємо ці схеми на основі комп'ютерного моделювання.

1. Найбільш простою схемою розподілення рідини є її ежектування через отвори, що виконані в горловині та (або) в конфузорі (рис. 8). При такому способі підведення рідини досягається доволі рівномірний розподіл рідини по поперечному перерізу. Однак:

- вирівнювання концентрації рідини відбувається майже на виході з горловини Вентурі;
- вхідні отвори для рідини в горловині повинні бути розміщені ближче до її початку (на моделі це зона синього кольору).

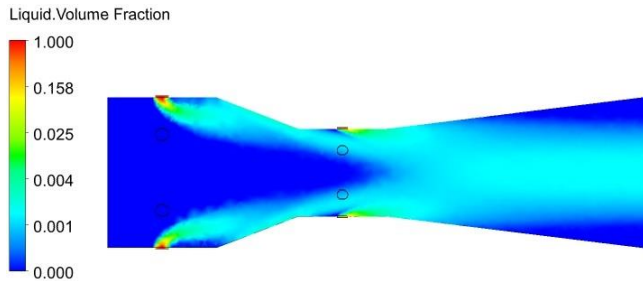


Рис. 8. Розподілення рідини у трубі Вентурі при периферійному підведенні рідини

Програма ANSYS надає можливість отримати результати щодо розподілення швидкостей і ліній течії окремо для газової та рідкої фаз. На рис. 9 (а) представлено розподілення швидкості, а на рис. 9 (б) — лінії течії газової фази в трубі Вентурі.

З наведених досліджень можна отримати уявлення про розподілення швидкості й траєкторії руху газу, а також отримати їх чисельні значення. Швидкість газу максимальна вздовж осі пиловловлювача і досягає 60 м/с, тоді як рідка фаза відтісняється до стінок горловини.

2. Підведення рідини виконано через форсунку в центральній частині конфузора. Вибір типу форсунки, ґрунтуючись на попередніх дослідженнях, очевидний: перевагу слід надавати відцентрово-струминним форсункам. Розподілення об'ємної концентрації рідини по поперечному перерізу представлено на рис. 10. Таке підведення рідини дає змогу зменшити гідравлічний опір обладнання, оскільки траєкторії руху газу та рідини збігаються при мінімальній відносній швидкості.

Спостерігається рівномірне розподілення рідини по поперечному перерізу і вже на вході в горловину пиловий потік активно контактує з мілкодисперсними краплями рідини, що отримують на виході із сопла форсунки.

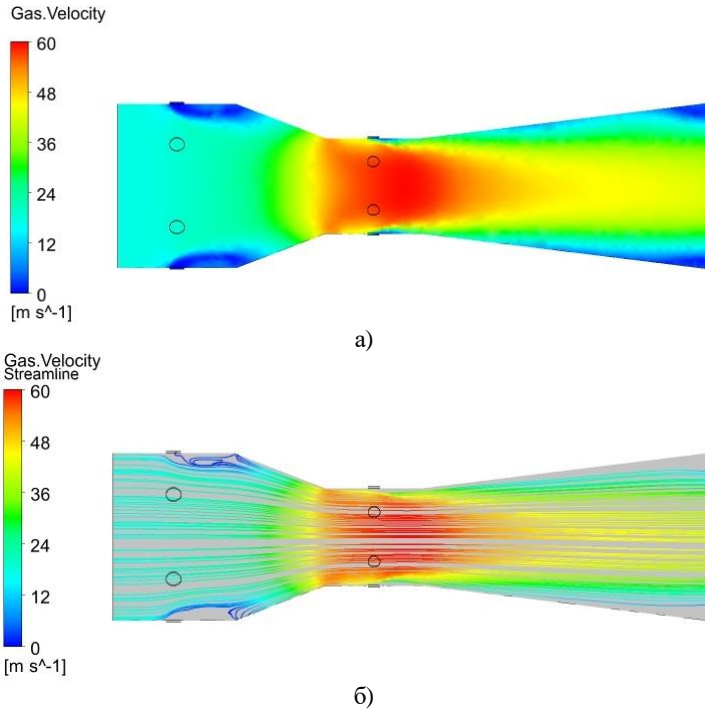


Рис. 9. Швидкість руху та лінії току газової фази в трубі Вентурі при периферійному підведенні рідини: а — швидкість газу; б — лінії току

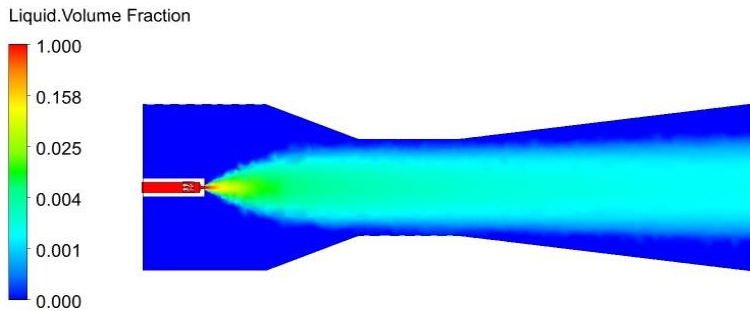


Рис. 10. Розподілення рідини у трубі Вентурі при її підведенні через відцентрово-струминну форсунку

Однак і така схема підводу рідини має недолік, який полягає в тому, що периферійна частина рідинного потоку відтісна від стінок горловини газом. Частина пилового потоку може пройти через пиловловлювач без достатнього зволоження.

На рис. 11 представлено розподілення швидкості газової фази в трубі Вентурі при підводі рідини по осі в конфузорі.

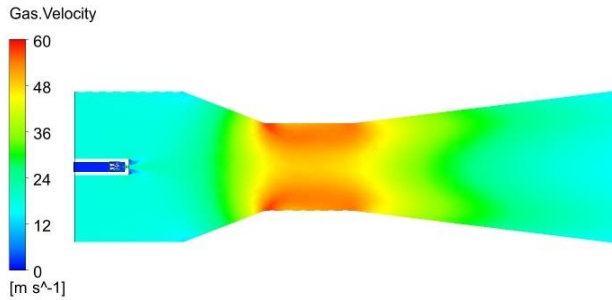


Рис. 11. Швидкість газової фази в трубі Вентурі при підведенні рідини через відцентрово-струминну форсунку

Унаслідок заповнення середини горловини труби Вентурі краплями диспергованої рідини, які рухаються з меншою швидкістю, ніж газовий потік, швидкість газу знижується до 45 м/с, а біля стінок горловини швидкість досягає 55 м/с, що підтверджує недостатню ефективність такої схеми зволоження пилу, оскільки периферійна частина газового потоку недостатньо оброблена.

На рис. 12 представлено результати моделювання комбінованого підводу рідкої фази в конфузор і горловину та в центральну частину труби Вентурі відцентрово-струминною форсункою.

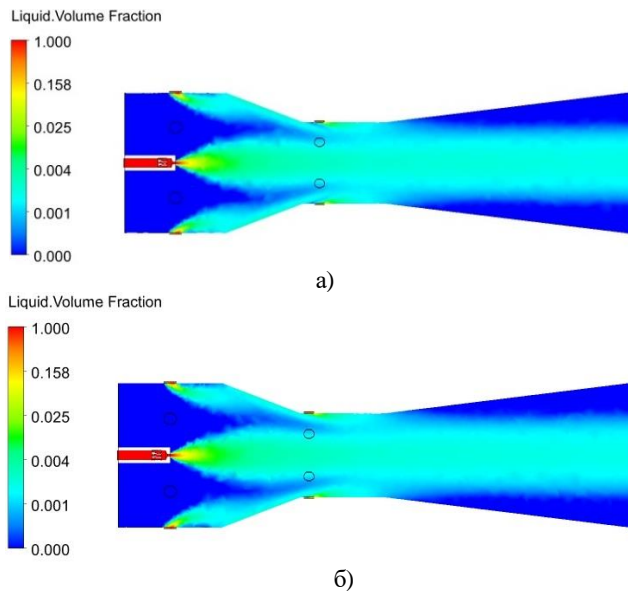


Рис. 12. Розподілення рідини у трубі Вентурі при комбінованій подачі рідини та симетричній витраті 0,835 кг/с через периферійні отвори та відцентрово-струминну форсунку: а — отвори в горловині виконані на відстані 0,2 її довжини; б — отвори в горловині виконані на відстані 0,1 її довжини

При моделюванні враховано результати попередніх досліджень і підвідні периферійні отвори в горловині перенесено на відстань 64 мм (20% від довжини

горловини) від її початку (рис. 12, а) та на відстань 32 мм (10% від довжини горловини) (рис. 12, б).

Як видно з наведених даних, при зміщенні вхідних отворів на відстань 10...20% від початку горловини значно покращується розподілення рідини в ній, ліквідовано застійні зони. Варто зазначити, що дані розподілення рідини в горловині Вентурі отримані при витраті рідини через відцентрово-струминну форсунку 0,835 кг/с, витраті рідини через отвори в горловині — 0,835 кг/с, витраті газу — 5 кг/с.

Аналіз результатів моделювання показує, що найкращий розподіл рідини по поперечному перерізу вловлювача досягається в останньому випадку при комбінованому підведенні рідини: центральному через відцентрово-струминну форсунку та периферійному при подачі рідини через отвори в конфузурі та горловині Вентурі. Вибір раціональної схеми подачі рідини та можливість отримання її рівномірного розподілення по поперечному перерізу спонукає до вирішення наступного питання: чи можливо зменшити витрату рідини без погіршення рівномірності зрошування?

Було проведено моделювання розподілення потоків рідини при витраті її через периферійні отвори в горловині Вентурі 0,835 кг/с та витраті 0,42 кг/с через сопло форсунки. При зменшенні подачі рідини діаметр сопла форсунки повинен бути зменшено з 10 мм до діаметра 7 мм. При цьому дисперсність крапель рідини не погіршується, оскільки тиск, при якому відбувається розпилення рідини залишиться сталим (0,25 МПа). На рис. 13 показано результати моделювання комбінованого підводу рідкої фази в конфузур і горловину та в центральну частину труби Вентурі відцентрово-струминною форсункою при зменшеній в два рази подачі рідини. На рис. 13, а підвідні канали зміщені на 64 мм (20% від довжини горловини) від її початку, а на рис. 13, б на відстань 32 мм (10% від довжини горловини).

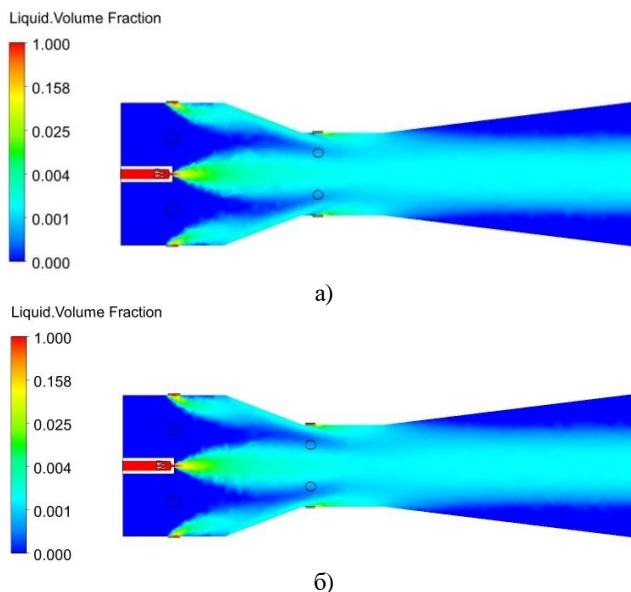


Рис. 13. Розподілення рідини у трубі Вентурі при комбінованій подачі рідини та витраті 0,835 кг/с через периферійні отвори та 0,42 кг/с через відцентрово-струминну форсунку: а — отвори в горловині виконані на відстані 0,2 її довжини; б — отвори в горловині виконані на відстані 0,1 її довжини

Порівняння графіків розподілення рідини рис. 12, а, б при її рівномірній витраті 0,835 кг/с через периферійні отвори і форсунку та рис. 13, а, б при витраті 0,835 кг/с через периферійні отвори та зменшеній в два рази витраті через форсунку показує задовільні результати. По поперечному перерізу горловини труби Вентури краплі рідини рівномірно розподілені, зон «проскоку» газової фази не спостерігається. Це підтверджує можливість зменшення витрати рідини.

Висновки

Комп'ютерне моделювання, здійснене в рамках дослідження, виявилось ефективним інструментом для точного відбору форсунок і візуалізації картини течії, сприяючи продуктивній роботі інженера та економії ресурсів.

За результатами дослідження рекомендується використовувати відцентрово-струминні форсунки для зволоження пилових викидів. Важливо також розташовувати периферійні отвори для подачі рідини в горловину труби Вентури на відстані 0,1...0,2 від її початку, що запобігає утворенню застійних зон.

Визначено можливість ефективного зменшення витрати рідини на форсунці вдвічі без втрати рівномірності її розподілення.

Проведені дослідження підтверджують покращення гідравлічного опору та забезпечують достатній час контакту фаз, що позитивно впливає на ефективність вловлювання пилу.

Подальші дослідження будуть направлені на визначення залежностей ефективності вловлювання пилу від витрати рідини та рівномірності зрошення з метою подальшого вдосконалення технології.

Література

- Mahniuk, V. M., Peleh, L. V., Melnichenko, S. A., & Petrov, Y. A. (2018). Hygienic assessment of the influence environmental impact of enterprises during the introduction of new modern technologies in sugar factories. *Hygiene of Populated Places*, (68), 37—45. <https://doi.org/10.32402/hygiene.2018.68.037>.
- Kuracina, R., Szabová, Z., & Menčík, M. (2018). Determination of explosion characteristics of sugar dust clouds. *TRANSACTIONS of the VŠB — Technical University of Ostrava, Safety Engineering Series*, 13(1), 15—20. <https://doi.org/10.2478/tvsbses-2018-0003>.
- Asadi, M. (2006). *Beet-Sugar handbook*. Wiley & Sons, Incorporated, John.
- Thorpe, D. G. L., Singh, S., Cartwright, P., & Bailey, A. G. (1985). Electrostatic hazards in sugar dust in storage silos. *Journal of Electrostatics*, 16(2—3), 193—207. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(85\)90042-7](https://doi.org/10.1016/0304-3886(85)90042-7).
- Bulygin, Y. I., Azimova, N. N., & Kuptsova, I. S. (2018). Problems of designing dust cleaning equipment in the industry. *Safety of Technogenic and Natural Systems*, 1—2, 2—12. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2018-1-2-2-12>.
- Ali, M., Yan, C., Sun, Z., Gu, H., & Mehboob, K. (2013). Dust particle removal efficiency of a venturi scrubber. *Annals of Nuclear Energy*, 54, 178—183. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.11.005>.
- Maalmi, M. (2014). Dust removal and collection techniques. *У Current environmental issues and challenges*, 137—157. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8777-2_8.
- Озарків, І., Сомар, Г., Соколовський, І., Кобринович, М., Сомар, Т., & Левчунець, О. (2016). Основи мокрого очищення газів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 26(4), 230—233. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=nnvntlu_2016_26.4_37.

Ponomarenko, V.; Pushanko, N. (2015). Sprays fluid: an effective way to intensify the processes in the food industry. LAP LAMBERT Academic Publishing: Saarbrucken, 2015.

Zhao, J., & Yang, L. (2012). Simulation and experimental study on the atomization character of the pressure-swirl nozzle. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 02(04), 271—277. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2012.24a032>.

Husted, B. P., Petersson, P., Lund, I., & Holmstedt, G. (2009). Comparison of PIV and PDA droplet velocity measurement techniques on two high-pressure water mist nozzles. *Fire Safety Journal*, 44(8), 1030—1045. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.07.003>.

Ali, H. (2017). Improvement of centrifugal wet scrubber design through laboratory experimentation and computational fluid dynamics [Thesis, Queensland University of Technology]. QUT ePrints. <https://eprints.qut.edu.au/112479>.

Plaza, Floren, Kent, Geoff, Rackemann, Darryn, & Stephens. (2014). Review and future options for computer modelling in the sugar industry. *Australian society of sugar cane technologists*, 288—297. <https://eprints.qut.edu.au/74758>.

Ali, M., Yan, C., Sun, Z., Gu, H., & Mehboob, K. (2013). Dust particle removal efficiency of a venturi scrubber. *Annals of Nuclear Energy*, 54, 178—183. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.11.005>.

Tomaszewski, A., Przybylinski, T., Kapica, P., & Lackowski, M. (2020). Influence of the spray scrubber geometry on the efficiency of dust removal — theoretical predictions and CFD analysis. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13(4), 1055—1066. <https://doi.org/10.36884/jafm.13.04.30926>.

Khadra, H., Kouider, R., Toufik Tayeb, N., Al-Kassir, A., & Carrasco-Amador, J. P. (2022). Numerical simulation of the cleaning performance of a venturi scrubber. *Energies*, 15(4), 1531. <https://doi.org/10.3390/en15041531>.