

В. В. МИХАЙЛЮК

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ORCID: 0000-0002-3329-2068

СЕПАРАТОР ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ КОНДЕНСАТУ ВОДЯНОЇ ПАРИ З ДИМОВИХ ГАЗІВ ЦЕМЕНТНОГО ВИРОБНИЦТВА

Димові гази, що продукуються цементними заводами під час виробництва цементу, негативно впливають на навколишнє середовище. У димових газах, окрім пилу та твердих частинок, також містяться пари води, вуглекислий газ, закис азоту, метан, озон, гексафторид сірки та інші сполуки, які відносяться до парникових газів. На даний час однією з найпоширеніших та основних технологій для зменшення вуглецевого сліду цементної промисловості є технологія уловлювання, зберігання та утилізації вуглецю. Окрім уловлювання викидів вуглекислого газу, ця технологія також допомагає зменшити вплив виробництва цементу на навколишнє середовище шляхом контролю викидів летких органічних сполук, пилу та твердих часток. Впроваджуючи нові технології, удосконалюючи методи виробництва та використовуючи альтернативні варіанти, цементна галузь може зменшити викиди і мінімізувати негативні наслідки для навколишнього середовища. Оскільки пари води є одним із парникових газів, що у результаті призводить до глобального потепління, то її конденсація та вилучення з цих димових газів є актуальним завданням. Для вилучення із димових газів цементних виробництв водяної пари пропонується охолоджувати димові гази до температури конденсації із подальшим вилученням із них краплинної рідини. Найменш затратним способом димовий газ можна охолодити за допомогою пристрою на основі сопла Лавалю, у якому він рухається із надзвуковою швидкістю, а відокремити конденсат пари – з допомогою сепаратійного обладнання (сепараторів). Для цього у даній роботі наведено розроблену функціональну схему установки для виділення рідини і механічних частинок з газового потоку. Відображено будову та описано принцип дії розробленого сепаратора. На розробленій тривимірній моделі сепаратора проведено імітаційні моделювання його роботи з врахуванням як складу газової суміші, так і її витрати, тиску та температури. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що 98% рідини сепарується із газорідної суміші розробленим сепаратором. Проведено експериментальні дослідження виготовленого сепаратора, який було підключено до джерела димових газів цементного виробництва після їх охолодження з допомогою багатосоплового пристрою (сопел Лавалю). У результаті встановлено, що результати імітаційного моделювання та експериментальних досліджень мають незначну розбіжність.

Ключові слова: цементне виробництво, вуглекислий газ, сепаратор, газовий потік, імітаційне моделювання.

V. V. MYKHAILIUK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Oil and Gas Machines
and Equipment

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: 0000-0002-3329-2068

SEPARATOR FOR SEPARATION OF WATER VAPOR CONDENSATE FROM FLUE GASES OF CEMENT PRODUCTION

Flue gases produced by cement plants during cement production have a negative impact on the environment. In addition to dust and solid particles, flue gases also contain water vapor, carbon dioxide, nitrous oxide, methane, ozone, sulfur hexafluoride and other compounds that belong to greenhouse gases. Currently, one of the most common and basic technologies for reducing the carbon footprint of the cement industry is carbon capture, storage and utilization technology. In addition to capturing carbon dioxide emissions, the technology also helps reduce the environmental impact of cement production by controlling emissions of volatile organic compounds, dust and particulates. By introducing new technologies, improving production methods and using alternatives, the cement industry can reduce emissions and minimize negative consequences for the environment. Since water vapor is one of the greenhouse gases, which ultimately leads to global warming, its condensation and extraction from these flue gases is an urgent task. In order to remove water vapor from the flue gases of cement production, it is suggested to cool the flue gases to the condensation temperature, followed by the removal of droplet liquid from them. In the least expensive way, flue gas can be cooled using a device based on a Laval nozzle, in which it moves at supersonic speed, and steam condensate can be separated using separation equipment (separators). For this purpose, this work presents the developed functional scheme of the installation for the separation of liquid and mechanical particles from the gas stream. The structure and principle of action of the

developed separator are described. On the developed three-dimensional model of the separator, simulation simulations of its operation were carried out, taking into account both the composition of the gas mixture, as well as its consumption, pressure and temperature. According to the simulation results, it was established that 98% of the liquid is separated from the gas-liquid mixture by the developed separator. Experimental studies of the manufactured separator were conducted, which was connected to the source of flue gases of cement production after their cooling using a multi-nozzle device (Laval nozzle). As a result, it was established that the results of simulation modeling and experimental studies have a slight discrepancy.

Key words: cement production, carbon dioxide, separator, gas flow, simulation modeling.

Постановка проблеми

Цементна промисловість є одним із основних джерел викидів парникових газів – приблизно 5–7% від загальних викидів CO₂ від промислових процесів. Окрім викидів CO₂, виробництво цементу також викидає в навколишнє середовище значну кількість пилу, важких металів та інших забруднюючих речовин [1, 2]. Викид цементними заводами великої кількості твердих частинок (у формі пилу) негативно впливає на якість повітря, спричинює проблеми з диханням і загострює серцево-судинні захворювання. Важкі метали, такі як ртуть, свинець, хром і кадмій, також виділяються під час виробництва цементу. Ці забруднювачі можуть потрапляти в місцеві джерела води, створюючи загрозу для водних екосистем і населення, що споживає цю воду. Вплив на здоров'я може варіюватися від легкого подразнення до важких неврологічних проблем і раку.

Викиди діоксиду сірки (SO₂) і оксидів азоту (NO_x) від виробництва цементу сприяють випаданню кислотних дощів, які можуть загрожувати лісовим насадженням, прісним водоймам і навіть завдати шкоди здоров'ю людини, подразнюючи дихальну систему.

Під час виробництва цементу споживається велика кількість води для обробки сировини та боротьби з пилом, надлишок якої з виробничого процесу скидається як стічна вода. Останні можуть містити важкі метали та інші забруднення, що чинить негативний вплив на водні ресурси.

Цементні заводи розташовані зазвичай в регіонах з великими покладами вапняку та іншої необхідної для виробництва сировини. Області з високою щільністю населення поблизу цих заводів найбільш часто страждають, оскільки мешканці піддаються забрудненню як повітря, так і води [1, 2].

Хоча цементна промисловість стикається із серйозними екологічними проблемами, сьогодні вживаються заходи до більш екологічних методів виробництва цементу. Компанії інвестують у такі технології, як уловлювання, утилізація та зберігання вуглецю (CCUS), альтернативні види палива та підвищення ефективності процесів для зменшення викидів CO₂.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З метою зменшення впливу виробництва цементу на навколишнє середовище у різних країнах впроваджують контроль за викидами, заохочуючи до використання альтернатив і забезпечуючи фінансові стимули для компаній інвестувати в чистіші технології. Наприклад, Європейський Союз встановив суворі обмеження на викиди важких металів і пилу з цементних заводів. Китай – найбільший світовий виробник – видав нові правила щодо скидання пилу та стічних вод із цементних заводів і встановив цілі щодо використання відновлюваної енергії та скорочення викидів вуглецю. Уряд США надає податкові пільги для розробки та впровадження альтернативних цементних технологій, таких як геополімерний цемент, і системи захоплення та утилізації вуглецю [3, 4].

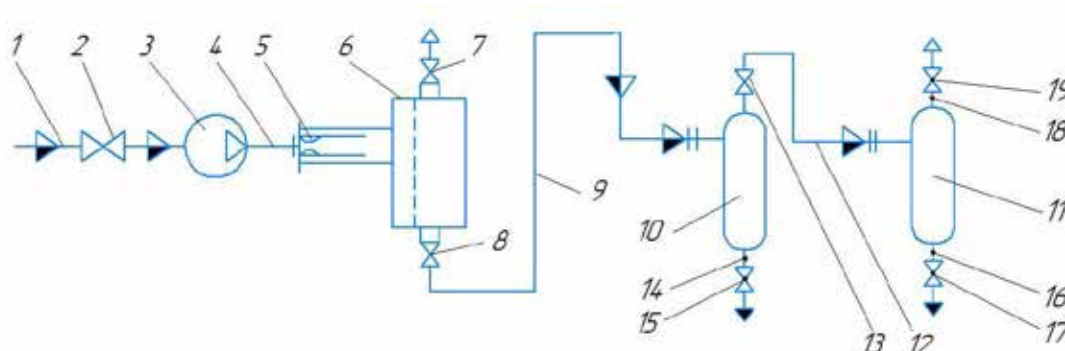
Наприклад, дослідницька та інноваційна програма Європейського Союзу «Горизонт 2020» підтримує проекти, спрямовані на сталі виробництво цементу. Прикладом є проект «Сталі цементні процеси», який розробляє технології для зменшення викидів вуглецю в цементному секторі. Подібним чином «Zero Waste Cement» Норвезького університету науки і технологій та дослідницька програма «GreenCem» у Швейцарській федеральній лабораторії матеріалознавства та технологій розглядають розвиток виробництва цементу без відходів [3, 4, 5].

Технологія уловлювання, утилізації та зберігання вуглецю (CCUS) є сьогодні однією із основних для зменшення вуглецевого сліду цементної промисловості. Окрім уловлювання викидів вуглекислого газу (CO₂), технологія CCUS також може допомогти зменшити вплив виробництва цементу на навколишнє середовище шляхом контролю викидів летких органічних сполук (ЛОС), пилу та твердих часток (РМ) [6–8].

Необхідно зазначити, що до основних парникових газів в атмосфері Землі відносяться пари води (H₂O), вуглекислий газ (CO₂), закис азоту (N₂O), метан (CH₄), озон (O₃), гексафторид сірки (SF₆), гідрофторвуглецеві сполуки (ГФВ) і перфторвуглецеві сполуки (ПФВ). Найбільшу роль у парниковому ефекті на Землі відіграє водяна пара, вміст якої в атмосфері становить близько 1% за об'ємом [9].

У роботі [10] для вилучення із димових газів цементних виробництв водяної пари пропонується охолоджувати димові гази до температури конденсації водяної пари та подальшого відокремлення отриманого конденсату. Також за використання такого способу відбуватиметься уловлювання пилу, механічних домішок та інших сполук шкідливих речовин краплинами конденсату.

Для цього розроблено «Спосіб виділення рідини і механічних домішок із газового потоку» особливості якого висвітлені у патенті на корисну модель [11]. Виділення з газового потоку високої температури $+120\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +160\text{ }^{\circ}\text{C}$ води і механічних частинок здійснюється в декілька етапів при мінімальних енерговитратах. Функціональна схема установки наведена на рисунку 1.



- 1 – патрубок; 2 – запірний елемент; 3 – компресор; 4 – патрубок; 5 – сопловий охолоджувач;
 6 – буферна камера; 7, 8 – запірний елемент; 9 – відвід; 10, 11 – сепаратор; 12 – патрубок;
 13 – запірний елемент; 14 – зливний патрубок; 15 – запірний елемент; 16 – зливний патрубок;
 17 – запірний елемент; 18 – патрубок; 19 – запірний елемент випуску очищеного газу

Рис. 1. Функціональна схема установки для виділення рідини і механічних частинок з газового потоку

Спочатку гарячий газовий потік перед надходженням в буферну камеру охолоджується у сопловій камері (за рахунок надзвукової швидкості), де пара перетворюється в дрібнодисперсні краплини рідини. Далі газорідинний потік надходить в каскад сепараторів, де краплинна рідина і механічні частини осаджуються та виводяться через нижні вихідні патрубки сепараторів, а очищений газ – через верхній патрубок кінцевого сепаратора.

Отже, на виході з установки отримується конденсат пари димових газів з наявними у ньому пилом та механічними домішками, який можна утилізувати або, за можливості, повторно використати у технологічному процесі.

З метою реалізації пропонованого способу із врахуванням складу та різних характеристик димових газів цементного виробництва розроблено багатосопловий пристрій 2 для охолодження димових газів (базується на принципі роботи сопла Лавалю) та газорідинний сепаратор 5.

Для відділення краплин конденсату із димових газів можна застосувати різноманітне обладнання, зокрема і газорідинні сепаратори, але при їх проектуванні необхідно звертати увагу на склад газу, технологічні параметри тощо.

Для відділення краплинної рідини від газового потоку застосовують різноманітні конструкції газорідинних сепараторів. Найбільше поширення сепаратори отримали у таких галузях промисловості: нафтогазова, хімічна, цементна, харчова, будівельна тощо. Застосування сепараторів підвищує ефективність процесу, якість продукції та безпеку.

Робота сепараторів базується на різних методах: інерційному ударі, гравітації, центрифугуванні або електростатичних силах, щоб відокремити краплі рідини від потоку газу завдяки різниці густин чи розмірах між фазами.

Донедавна нові конструкції сепараційного обладнання розробляли на основі практичного досвіду попередніх дослідників, а також користуючись спрощеними математичними моделями. Звичайно, такий підхід вимагав значних фізичних та економічних затрат та дуже часто не давав бажаного результату. В сучасних умовах розвитку комп'ютерної техніки вирішення складних актуальних задач неможливо уявити без використання програмних комплексів, які дають можливість моделювати той або інший процес в апараті, вивчення якого є надзвичайно трудомісткою задачею. Широкого застосування під час розроблення сепараційного обладнання отримали програми, що реалізують метод скінченних елементів. Однією з таких програм є модуль програми SolidWorks – Flow Simulation. Проте, теоретичні дослідження роботи сепараційного обладнання за допомогою Flow Simulation зводяться не лише до аналізу руху газового потоку з твердою фазою в робочій зоні апарату та розрахунку на основі одержаних даних оптимальних геометричних розмірів, але й визначення основних технологічних характеристик роботи дослідного зразка – ефективності вловлювання частинок різних розмірів та гідравлічного опору [12].

Аналіз та узагальнення результатів теоретичних експериментів, які одержані для різних конструктивних та режимних параметрів роботи обладнання, дають підставу зробити висновок про те, що використання модуля Flow Simulation дозволяє: попередньо оцінити енергетичні затрати на процес очищення запиленого газу; проаналізувати траєкторію руху закрученого газового потоку в апараті та розробити практичні рекомендації при

розробці нового та модернізації існуючого сепараційного обладнання; дозволяє значно скоротити час та затрати на розробку, проектування та експериментальні дослідження різноманітного сепараційного обладнання [12].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є імітаційне моделювання та експериментальні дослідження роботи газорідинного сепаратора для відокремлення конденсату водяної пари з димових газів цементного виробництва.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для виділення рідини із димових газів цементного виробництва пропонується багатоступенева система уловлювання, що реалізована у пропонованому газорідинному сепараторі, конструкція якого показана на рисунку 2.

Опишемо принцип роботи сепаратора. Газорідинна суміш потрапляє до вхідного патрубку 4, і входячи у корпус сепаратора 1, змінює свій напрямок за рахунок дефлектора 7. При цьому відбувається закручування газорідинного потоку та його тангенційний рух внутрішньою поверхнею корпусу 1.

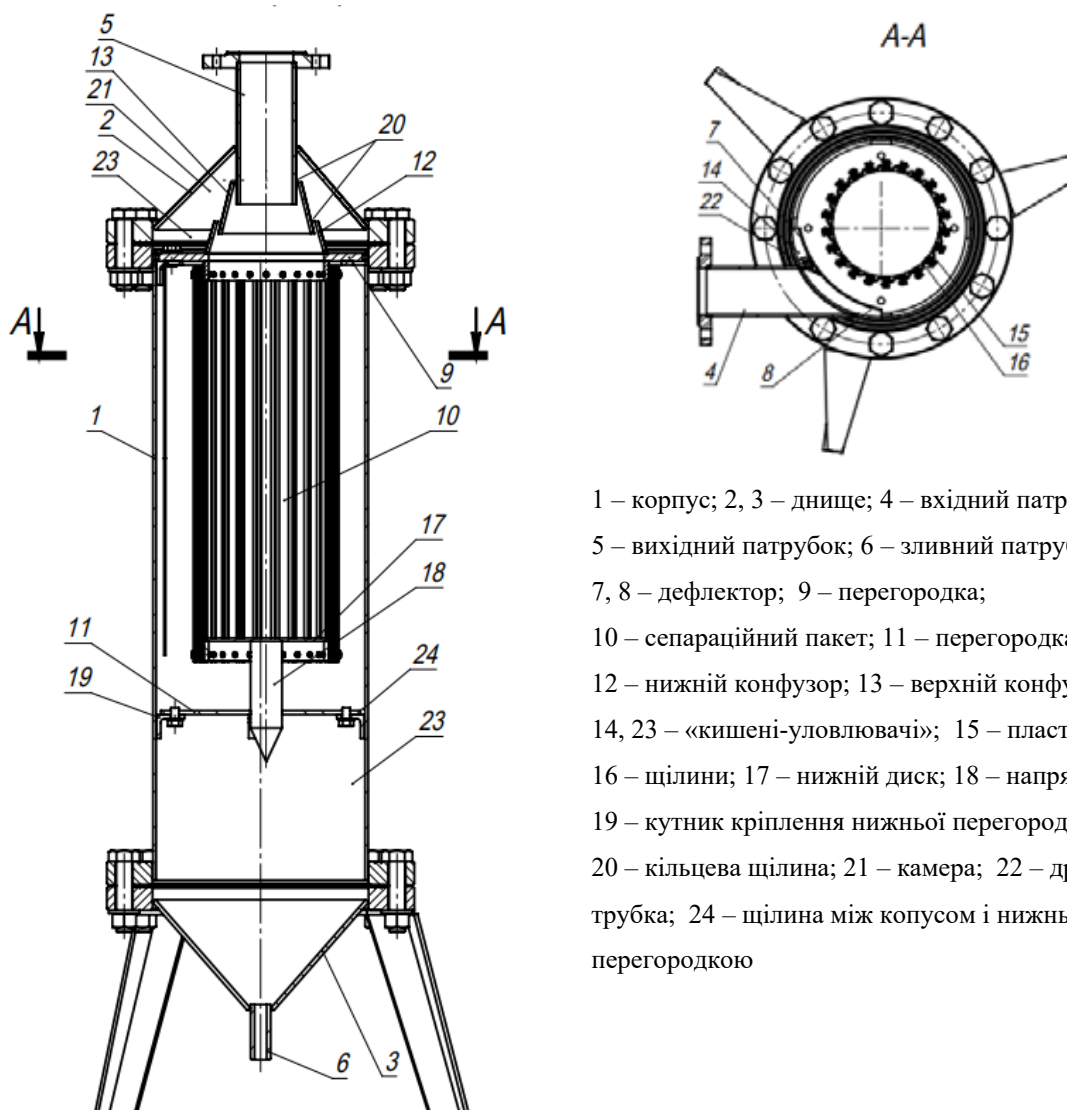


Рис. 2. Схема пропонованої конструкції газорідинного сепаратора

За рахунок зміни напряму руху та дії відцентрової сили, краплини рідини коагулюються та відділяються від газового потоку. Частина рідини, що відділилась, продовжує рухатись тангенційно і стікає у днище 3 сепаратора. Для відбору рідини, що рухається тангенційно, передбачено дефлектор 8. Рідина у цьому дефлекторі зупиняється, коагулюється та під дією сили тяжіння стікає у днище 3. При цьому газ, який знаходиться ближче до центра осі сепаратора, проходить у щілини 16, утворені пластинами 15. На цих пластинах осідають краплини рідини, які не були відділені на попередньому етапі. Ці краплини із пластин 15 стікають вниз і потрапляють на поверхню нижньої перегородки 11, і далі, рухаючись крізь щілину 23, стікає у днище 3.

Легка рідинна плівка, що залишилася у кишені-уловлювачі 23, надходить разом з потоком суміші в зону вихідних конфузурів 12 і 13. Рухаючись у висхідному газовому потоці поверхнею конфузурів 12 і 13, рідина потрапляє в щілини 20, звідки осідає у верхній накопичувальній камері 21, з якої під дією гравітаційних сил відводиться дренажною трубою 22 у нижню частину корпусу 1 сепаратора і потрапляє у днище 3. Очищений від рідини газ відводиться із сепаратора через вихідний патрубок 5, а зібрана на усіх ступенях рідина з днища 3 сепаратора відбирається через зливний патрубок 6.

Для дослідження запропонованої конструкції газорідинного сепаратора з врахуванням властивостей газорідинної суміші, визначення ефективності сепаратора за різних технологічних параметрів тощо, розроблено його тривимірну модель у програмі SolidWorks.

Сітка скінченних елементів газорідинного сепаратора має певні особливості (рис. 3). У програмі FlowSimulation можливі такі варіанти побудови сітки: глобальна та локальна. Необхідно звернути увагу, що у конструкції сепаратора наявні щілини малих розмірів. При застосуванні глобальної сітки вони або не враховуватимуться, або отримані результати не матимуть достатньої точності. Тому для таких елементів застосовано індивідуальний підхід із використанням локальної сітки з відповідними її налаштуваннями.

На вихідному патрубку сепаратора задано об'ємну витрату газової суміші величиною $0,12 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4). Швидкість на всіх стінках сепаратора рівна нулю. На вхідному патрубку сепаратора задано тиск величиною 124838 Па . Такі величини тиску та витрати газової суміші обумовлені технологічною схемою сепарації газу на виробництві, де досліджуватиметься сепаратор.

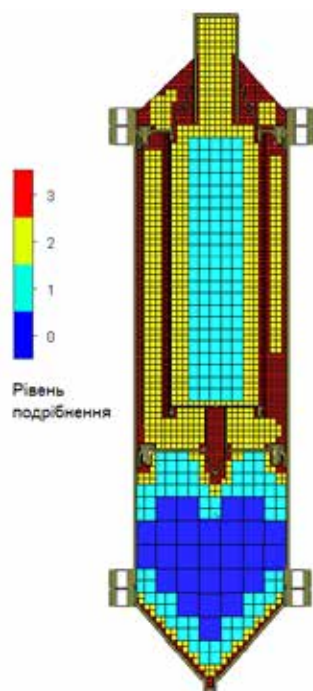


Рис. 3. Сітка скінченних елементів

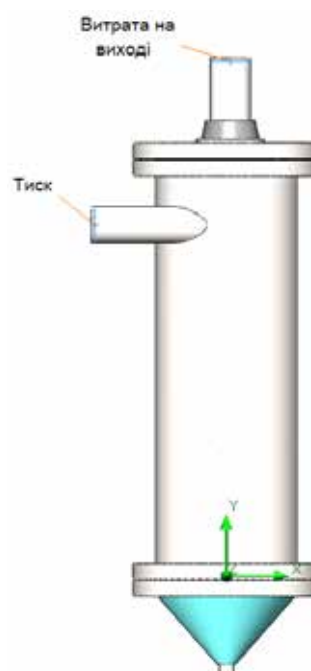


Рис. 4. Граничні умови

Оскільки газовий потік є багатокомпонентним, тобто складається із різних газів, то їхня масова концентрація також врахована під час імітаційного моделювання. Склад газової суміші при виробництві цементу: азот – 28%; вода – 11%; вуглекислий газ – 22%; кисень – 9%; повітря – 30% [9].

Для контролю параметрів сепаратора вибрано декілька його перерізів: поздовжній та поперечний по осі вхідного патрубка (аналогічно, як зображено на рисунку 2).

Оскільки основне призначення розгляданого сепаратора – очищення газового потоку від краплинної рідини, то для визначення ефективності сепарації у програмі FlowSimulation використано модуль «Particle Studies». У цьому модулі задано такі фракції краплин рідини (води): $0,01\text{--}0,1 \text{ мм}$ з кроком $0,01 \text{ мм}$. Також у налаштуваннях задано напрям дії сил гравітації та витрату краплинної рідини $0,00236 \text{ кг/с}$.

Під час виведення результатів імітаційного моделювання роботи сепаратора необхідно зауважити, що можливо розглядати два варіанти значень контрольованих параметрів: глобальний максимум та локальний максимум. Мається на увазі, що коли виводяться результати у поперечному перерізі по осі сепаратора, то при виборі параметра «глобальний максимум» максимальне значення контрольованого параметру може знаходитись у іншій точці (частині) сепаратора. Тому для контролю параметрів у вибраних поперечних перерізах сепаратора слід

застосовувати параметр «локальний максимум» за якого максимальне значення параметру знаходиться у розглядуваному перерізі.

На рисунку 5 показано розподіл тиску та швидкості у поздовжньому перерізі сепаратора.

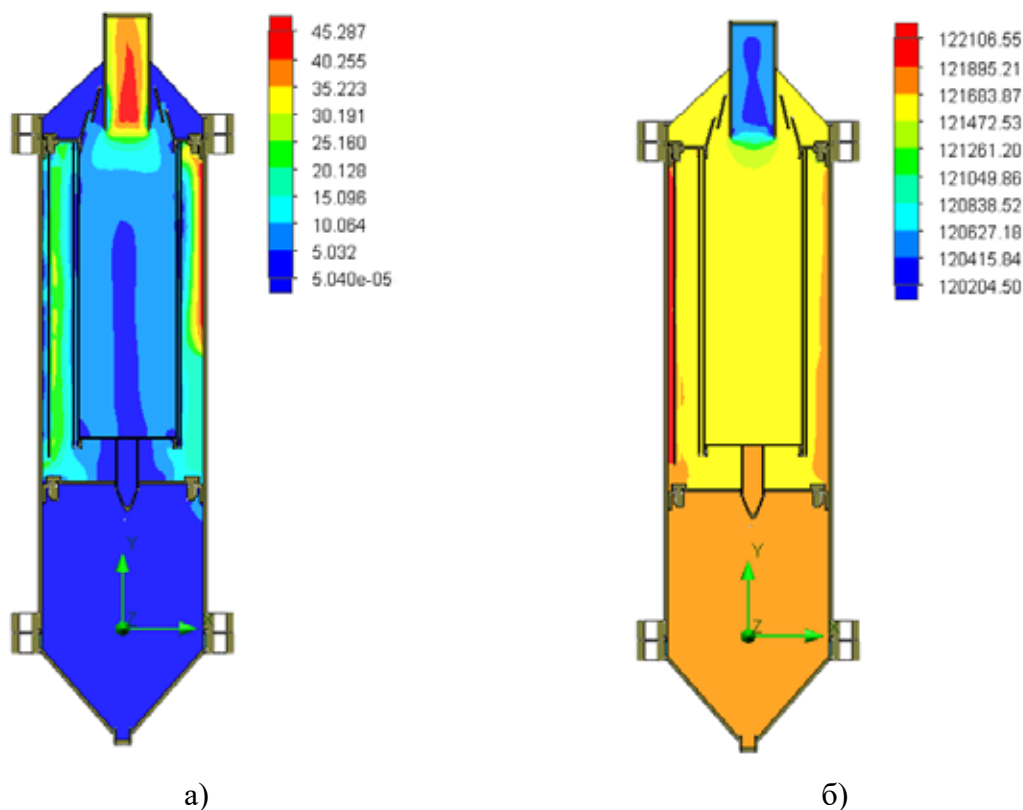


Рис. 5. Розподіл швидкості (м/с) (а) та тиску (Па) (б) у поздовжньому перерізі сепаратора

Нижче на рисунку 6 наведено розподіли тиску та швидкості у поперечному перерізі вздовж осі вхідного патрубка сепаратора.



Рис. 6. Розподіл швидкості (м/с) (а) та тиску (Па) (б) у поперечному перерізі сепаратора вздовж осі вхідного патрубка сепаратора

Отже, виходячи з результатів імітаційного моделювання, в середньому кількість частинок рідини, яка виходить разом з газовим потоком із сепаратора, складає 2%. Тобто, 98% рідини сепарується із газоріднинної суміші за допомогою розробленого сепаратора.

Для проведення експериментальних досліджень розробленої та виготовленої конструкції сепаратора його було під'єднано до джерела димових газів цементного виробництва (рис. 7).



- 1 – вхідний патрубок;
- 2 – багатосопловий пристрій;
- 3 – буферна камера;
- 4 – сепаратор;
- 5 – вихідний патрубок

Рис. 7. Установка для очищення димових газів цементного виробництва від водяної пари, пилу та механічних домішок

Неочищений газовий потік надходить через вхідний патрубок 1. Далі – проходячи багатосопловий пристрій 2 він охолоджувався та поступав у буферну камеру 3, а звідти – на сепаратор 4, з якого викидався у навколишнє середовище через вихідний патрубок 5.

У ході проведення експериментальних досліджень сепаратора відділено з газового потоку 8,3 л/год рідини, а у очищеному газовому потоці залишилось 0,25 л/год. Виявленні залишки вологи можна відбирати, використовуючи другу ступінь сепарації або адсорбер.

Порівнявши отримані результати імітаційного моделювання та експериментальних досліджень, встановлено незначну розбіжність між ними.

Висновки

Існуючі технології та обладнання для відокремлення рідини із газового потоку на даний час є надзвичайно енерговитратними. Пропонований спосіб відділення краплинної рідини із газового потоку дозволяє як мінімізувати енерговитрати, так і зменшити габаритні розміри та спростити конструкцію використовуваного обладнання. Обладнання, що використовується у пропонованому способі, є компактним, не потребує частого обслуговування та спеціально підготовленого персоналу.

Проведене імітаційне моделювання роботи пропонованої конструкції газорідинного сепаратора із врахуванням як умов роботи (тиску, температури) так і складу димового газу, дозволило встановити, що 98% рідини сепарується із газорідинної суміші розробленим сепаратором.

Проведені експериментальні дослідження виготовленого сепаратора на цементному виробництві на відібраному димовому газі підтвердили результати імітаційного моделювання його роботи. Із димового газу було відібрано 8,3 л/год рідини, а у очищеному газовому потоці залишилось 0,25 л/год.

Список використаної літератури

1. Глобальний цемент і навколишнє середовище: огляд, European Cement Research Academy. (2017). URL: http://www.cement-tech.info/en/info-detail/news/cement-industry-and-the-environment/global-cement-and-the-environment-an-overview_59787/
2. Цементна промисловість та її вплив на навколишнє середовище: огляд. (2021). URL: https://www.researchgate.net/publication/349506035_Cement_Industry_and_its_Environmental_Impacts_An_Overview
3. «Ініціатива сталого розвитку цементу: глобальний підхід до сталого виробництва цементу». Глобальна асоціація цементу та бетону, 2023 р. URL: <https://www.worldcement.com/issues/the-cement-sustainability-initiative>
4. «Стійке виробництво цементу». Європейська комісія, 2023. URL: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/cement-production_en
5. «Горизонт 2020 – Сталі цементні процеси». Європейський Союз, 2023. URL: https://ec.europa.eu/research/partner-alert/project/grant-agreement-Horizon-2020-SC3-Sustainable-Cement-Processes_699283
6. «CCUS в цементі: уловлювання та використання CO₂». Компанія XYZ, 2023 р. URL: [https://companyxyz.com/ccus-in-cement-capturing-and-utilizing-CO₂](https://companyxyz.com/ccus-in-cement-capturing-and-utilizing-CO2)

7. «Впровадження CCUS для Cement Industries». ARCADIS, 2023. URL: <https://www.arcadis.com/global/en/knowledge/implementation-ccus-for-cement-industries.aspx>
8. «Технології уловлювання, утилізації та зберігання вуглецю». Енергетична освіта, 2023. URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Carbon_Capture_Utilization_and_Storage_Technologies
9. Плашихін С. В. 9. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. цементна промисловість. Київ: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. 96 с.
10. Михайлюк В. В. Лабораторно-експериментальна установка для отримання конденсату димових газів та його утилізація. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. № 3 (279) 2023. С. 16-24.
11. Спосіб виділення рідини і механічних частинок з газового потоку: пат. 152837 Україна: В03С 3/02. № 202200306; заявл. 25.01.22, опубл. 19.04.23, Бюл. № 16. 4 с.
12. Майструк В.В. Оцінка енергозатрат при роботі прямотечійного циклону за допомогою програмного пакету FLOW SIMULATION / В.В. Майструк, Р.І. Гаврилів, А.С. Попіль, А.М. Басистий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харків. 2012. Вип. 6/8(60). С. 28-30.

References

1. Globalnyi tsement i navkolyshnie seredovyshe: ohliad, European Cement Research Academy. (2017). Retrived from http://www.cement-tech.info/en/info-detail/news/cement-industry-and-the-environment/global-cement-and-the-environment-an-overview_59787/
2. Tsementna promyslovist ta yii vplyv na navkolyshnie seredovyshe: ohliad. (2021). Retrived from https://www.researchgate.net/publication/349506035_Cement_Industry_and_its_Environmental_Impacts_An_Overview
3. Initsiatyva staloho rozvytku tsementu: hlobalnyi pidkhid do staloho vyrobnytstva tsementu. (2023) Retrived from <https://www.worldcement.com/issues/the-cement-sustainability-initiative>
4. Stiike vyrobnytstvo tsementu. (2023). Retrived from https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/cement-production_en
5. Horyzont 2020 – Stali tsementni protsesy. (2023). Retrived from https://ec.europa.eu/research/partner-alert/project/grant-agreement-Horizon-2020-SC3-Sustainable-Cement-Processes_699283
6. CCUS v tsementi: ulovliuvannya ta vykorystannya CO₂. Kompaniia XYZ. (2023) Retrived from <https://companyxyz.com/ccus-in-cement-capturing-and-utilizing-CO2>
7. Vprovadzhenia CCUS dlia Cement Industries. ARCADIS. (2023). Retrived from <https://www.arcadis.com/global/en/knowledge/implementation-ccus-for-cement-industries.aspx>
8. Tekhnolohii ulovliuvannya, utylizatsii ta zberihannya vuhletsiiu. Enerhetychna osvita. (2023). Retrived from https://energyeducation.ca/encyclopedia/Carbon_Capture_Utilization_and_Storage_Technologies
9. Plashykhin, S. V. (2020). *Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. tsementna promyslovist*. Kyiv: Tsentr resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva.
10. Mykhailiuk, V.V., (2023). Laboratorno-eksperymentalna ustanovka dlia otrymannya kondensatu dymovykh haziv ta yoho utylizatsiia. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. 3(279), 16-24.
11. Patent na korysnu model № 152837, Ukraina, V03S 3/02. Sposib vydilennia ridyny i mekhanichnykh chastynok z hazovoho potoku // Kryzhanivskiy Ye.I. (UA); Liakh M. M. (UA); Mykhailiuk V. V. (UA); Makoviichuk M.V. (UA); Kuchirka Yu.M. (UA); Vytrykhovskiy Ye.A. (UA) u202200306; Zaiavl. 25.01.2022; Opubl. 19.04.2023, Biul. № 16. 4 s.
12. Maistruk, V.V., Havryliv R.I., Popil, A.S., Basisty A.M. (2012). Otsinka enerhozatat pry roboti priamotechiinoho tsyklonu za dopomohoiu prohramnoho paketu FLOW SIMULATION. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. 6/8(60), 28-30.