

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-279-3-16-24>

УДК 691.3

ЛАБОРАТОРНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ОТРИМАННЯ КОНДЕНСАТУ ДИМОВИХ ГАЗІВ ТА ЙОГО УТИЛІЗАЦІЯ

Михайлюк В. В.

LABORATORY EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR OBTAINING FLUE GAS CONDENSATE AND ITS DISPOSAL

Mykhailiuk V.V.

На даний час цемент є одним із основних будівельних матеріалів, який використовується під час спорудження різноманітних інженерних конструкцій та споруд. Технологічний процес виготовлення цементу є багатоетапним та вимагає високої культури виробництва для забезпечення екологічної безпеки. Повний цикл виробництва товарного цементу негативно впливає на навколишнє середовище: глобальне потепління (через викиди парникових газів), підкислення Світового океану (переважно, через викиди оксидів вуглецю, азоту, сірки), деградацію земель (через забруднення земель важкими металами). Існують різноманітні способи виготовлення цементів, які відрізняються технологічно і звичайно по-різному впливають на екологію. Тому важливим залишається вивчення основних видів викидів під час виготовлення цементу та заходів для зменшення або усунення їх впливу на навколишнє середовище. Основними проблемами під час виробництва цементу є зниження викидів водяної пари, пилу, оксидів азоту NO_x , діоксиду сірки, оксиду та діоксиду вуглецю. Для очищення чи зменшення таких забруднень використовують різноманітне обладнання: електрофільтри, рукавні фільтри, гібридні фільтри, мокрі скрубери тощо. Проте застосування вищезгаданого обладнання не повністю усуває шкідливі викиди при виробництві цементу. У роботі пропонується спосіб та обладнання для зниження викидів шкідливих речовин з димових газів цементного виробництва – спосіб виділення рідини і механічних домішок із газового потоку. Основною задачею пропонованого способу є підвищення ефективності очищення газу у великих об'ємах від водяної пари та механічних домішок для забезпечення екологічної безпеки, що полягає у вилученні водяної пари (отримання конденсату пари димових газів). З метою утилізації конденсату пари димових газів пропонується його застосування у виробництві бетону. Проведено експериментальні дослідження

цементного каменю отриманого з використанням конденсату пари димових газів цементного виробництва. При цьому визначено механічні характеристики отриманого цементного каменю (напруження згину $\sigma_{зз}$, стиску $\sigma_{ст}$ та крихкість K_K) та проведено їх порівняння із цементним каменем виготовленим за традиційним способом. Встановлено, що найкращим за механічними властивостями є цементний камінь, отриманий із застосуванням конденсату пари димових газів.

Ключові слова: цемент, шкідливі викиди, газорідний сепаратор, конденсат пари димових газів, цементний камінь, бетон, утилізація.

Вступ. Цемент – один із найпоширеніших будівельних матеріалів, який використовується для виготовлення бетонів, залізобетонних виробів, для скріплення окремих деталей будівельних конструкцій, гідроізоляції, також під час спорудження свердловин, виготовлення фундаментів під різноманітні машини та механізми у нафтогазовій галузі.

Коротко наводимо інформацію про виробництво цементу.

Цементна промисловість – матеріаломістка галузь, тому цементні заводи розміщують у районах видобування сировини. При виробництві 1 т клінкеру (напівфабрикату цементу) витрачається 1,5 т карбонатних порід (мергелю, доломіту, вапняків, крейди) і майже 0,5 т глини [1].

Життєвий цикл цементу розпочинається з отримання сировини (мергель, вапняк, крейда, глина) у кар'єрах, які розташовані переважно поблизу цементного заводу. Після видобутку

сировина подрібнюється безпосередньо в кар'єрі і транспортується на цементний завод для проміжного зберігання, гомогенізації і подальшої переробки. На наступному етапі сировина сушиться і перетирається в певних і добре контрольованих пропорціях у млинах, в результаті чого виходить сировинна мука для сухого (і напівсухого) процесу. При мокрому процесі сировина подрібнюється з певною кількістю води для отримання рідкого цементного тіста. Добутий проміжний продукт – тобто сировинне борошно або рідке цементне тісто (або їх похідні) – зберігається і далі гомогенізується в бункерах сировинної суміші або шламових басейнах, в результаті чого досягається і підтримується необхідний однорідний хімічний склад перед відправленням у піч. Далі готова сировина надходить у печі, де піддається тепловому обробленню, яка складається з послідовних етапів висихання/підігріву, прожарювання і спікання. Спечений продукт «клінкер» охолоджується потоком повітря до 100-200°C і транспортується до місця зберігання. На наступному етапі відбувається помол клінкеру з додаванням різних добавок. Після цього отриманий цемент пакується і транспортується до кінцевого споживача [1].

Повний цикл виробництва товарного цементу впливає на всі критичні процеси земної системи, які загрожують екологічній стійкості планети, – на глобальне потепління (через викиди парникових газів), підкислення Світового океану (переважно, через викиди оксидів вуглецю, азоту, сірки), деградацію земель (через забруднення земель важкими металами).

Виробництво цементу щорічно вносить у атмосферу біля 8% від загального об'єму вуглекислого газу. Це величезні об'єми, знизити які намагаються багато вчених з усього світу. Для цього використовують енергозберігаючі технології, унікальні добавки та техпроцеси тощо [1].

У виробництві цементу використовують переважно мокрий, сухий, напівсухий та комбінований способи. Перелічені технології різняться за способам приготування сировинної суміші та випалу клінкеру. Матеріальні баланси процесу виробництва 1 т портландцементного клінкеру мокрим та сухим способами виробництва [1].

В екологічному аспекті мокрий спосіб має найбільший негативний вплив на довкілля з урахуванням витрат матеріальних ресурсів і викидів забруднюючих речовин [2]. Споживання матеріальних ресурсів і викидів збільшується на 1,5 т/т клінкеру. Виробництво

портландцементного клінкеру мокрим способом, порівняно з сухим, вимагає майже вдвічі більших витрат палива. Тепло, що виділяється при спалюванні технологічного палива, витрачається на теплові процеси клінкероутворення, випаровування води, а також втрачається з газами, що відходять, з повітрям з клінкерного холодильника, з гарячим клінкером і на прямі втрати у довкілля.

Виробництво портландцементу є матеріаломістким процесом. Промислові відходи різного походження можуть заміщувати значну кількість сировинних матеріалів при випалюванні портландцементного клінкеру. Також постійно збільшується використання промислових відходів в якості мінеральних добавок при помолі портландцементу [2].

Використання промислових відходів як сировини при виробництві цементу зазвичай дозволяє знизити питомі витрати тепла на випал 1 т портландцементного клінкеру і підвищити продуктивність обертової печі.

Постійний контроль за вмістом шкідливих речовин у відходах і використання правильного способу їхнього введення до складу сировинної суміші або цементу запобігає збільшенню шкідливих викидів в атмосферу при випалюванні портландцементного клінкеру або помолу портландцементу і не впливає на якість виробленого цементу [2].

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Під час виробництва цементу виділяється багато різноманітних викидів, які негативно впливають на навколишнє середовище. З метою зменшення цих викидів розроблено багато різних технологій і цілих комплексів обладнання.

Зниження викидів пилу з організованих джерел [1]

На цементному заводі є різні джерела організованих викидів пилу: печі, клінкерні холодильники і млини для помолу сировинних матеріалів, цементу та вугілля, а також допоміжне обладнання. Основна частина пилу викидається в атмосферу з обертових печей для випалу портландцементного клінкеру. Однак методи і принципи зниження викидів пилу з обертових печей використовуються і для інших джерел організованих викидів пилу.

Основна частина викидів пилу (у тому числі розміром частинок менше 2,5 мкм) може бути знижена за рахунок зменшення загальної величини пиловиділення, що досягається шляхом використання ефективної системи пиловловлювання. У минулому використовувалися різні

знепилюючі пристрої, а з 2007 року головними знепилюючими установками стали рукавні фільтри, електрофільтри або їх поєднання – так звані гібридні фільтри.

Для зниження викидів пилу з організованих джерел використовуються технології та обладнання:

- сучасні електрофільтри або рукавні фільтри, оптимізовані для очищення конкретного виду газів;

- гібридні фільтри;

- системи управління ремонтом, спеціально спрямованої на спостереження за станом фільтрів.

Зниження викидів пилу з неорганізованих джерел [1].

Джерелами утворення неорганізованих пилових викидів є процеси складування та переробки сировинних матеріалів, палива і клінкеру, а також будь-які транспортні засоби, що використовуються на території виробництва. Компактне розташування об'єктів є найбільш простим способом зниження неорганізованих викидів пилу. Регулярне і ретельне обслуговування установок завжди призводить до прямого зниження неорганізованих викидів пилу завдяки зменшенню підсосу повітря або запобігання негерметичності установок.

Використання автоматичних приладів і системи контролю також сприяє зниженню викидів пилоподібних частинок, так само як і постійна безвідмовна надійна робота установок. Щоб знизити викиди дисперсного пилу на відкритому складі, де розміщені сировинні матеріали або паливо, штабелі і майданчики навалного зберігання можуть бути закриті або укріплені за допомогою різних перегородок, покриттів, розділені стінами або огорожами, що складаються з вертикальних зелених рослин (штучні або природні бар'єри для запобігання впливу вітру).

Для досягнення мінімізації викидів пилу з неорганізованих джерел використовуються наступні технології та обладнання:

- укриття/капсулювання операцій, пов'язаних з виділенням пилу;

- використання закритих конвеєрів та елеваторів;

- зменшення місць підсмоктування повітря або просипання матеріалу, герметизація установок;

- використання гнучких шлангів та рукавів, забезпечених системою уловлювання пилу, при навантаженні цементу в цементовоз;

- захист від вітру;

- водне обприскування і хімічні речовини, що пригнічують утворення пилу;

- покриття, миття доріг та їхнє прибирання;

- зволоження штабелів.

Зниження викидів оксидів азоту NO_x [1].

Випал клінкеру є високотемпературним процесом, в результаті якого утворюються оксиди азоту. Ці оксиди є одними з ключових забруднювачів, що викидаються цементними заводами в повітря. Вони утворюються в процесі обпалу зв'язуванням азоту з киснем у полум'ї або зв'язуванням атмосферного азоту та кисню повітря, що подається на горіння.

Існує два джерела для утворення NO_x :

1) теплові NO_x : частина азоту в повітрі під час горіння взаємодіє з киснем з утворенням оксидів азоту;

2) паливні NO_x : сполуки, які містять азот, хімічно зв'язані в паливі, реагують з киснем повітря з утворенням різних оксидів азоту.

Для зниження викидів NO_x застосовуються як первинні технічні рішення, інтегровані в технологічний процес, так і спеціальні технології або їхнє поєднання з первинними технічними рішеннями:

- оптимізація процесу випалу;

- охолодження полум'я факела;

- застосування пальників з низьким виділенням NO_x ;

- постадійне спалювання палива, спалювання палива в середній частині печі;

- використання мінералізаторів;

- технологія селективного некаталітичного відновлення NO_x (SNCR);

- технологія селективного каталітичного відновлення NO_x (SCR).

Для зниження викидів NO_x у відведених пічних газах використовують:

- оптимізацію процесу випалу;

- охолодження полум'я факела;

- пальники з низьким виділенням NO_x ;

- постадійне спалювання палива, спалювання палива в середній частині печі;

- мінералізатори при випалюванні клінкеру;

- технології селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту SNCR;

- технології селективного каталітичного відновлення оксидів азоту SCR.

Викиди діоксиду сірки [1].

Викиди SO_2 на цементних заводах залежать від загальної кількості сульфатних сполук, способу виробництва і передусім визначаються вмістом леткої сірки в сировинних матеріалах і паливі. Потенційні викиди SO_2 залежать від

циркуляції сірки в печі. Сірка викидається з печей у вигляді SO_2 у вихідних газах, CaSO_4 та інших компонентах клінкеру і пилу. Однак значна частина сірки залишається у клінкері або вивантажується з системи.

Зниження викидів діоксиду сірки SO_2 при виробництві цементу здійснюється по стадійно.

Першим кроком зниження викидів SO_2 є реалізація первинних технічних рішень:

- вибір сировинних матеріалів, палива і відходів (при їхньому використанні) з невисоким вмістом вільної сірки або сірки у вигляді сульфідів;

- оптимізація процесу випалу клінкеру, що передбачає стабільну роботу печей;

- однорідний розподіл нагрітого матеріалу в печі;

- запобігання утворенню відновлювальної атмосфери при випалюванні клінкеру.

Концентрація кисню на вході матеріалу в піч є вирішальним фактором зв'язування SO_2 сировинними матеріалами. Збільшення вмісту кисню в печі знижує кількість викидів SO_2 . Надлишок кисню забезпечує утворення сульфатів у нижній частині циклонного теплообмінника, які виходять з печі разом з клінкером.

Застосування системи байпасу запобігає накопиченню в печі легкоплавких сульфідів лужних металів і призводить до деякого зниження викидів SO_2 .

Баланс для захисту довкілля повинен бути знайдений завдяки оптимізації співвідношення викидів $\text{NO}_x/\text{SO}_2/\text{CO}$ шляхом регулювання вмісту кисню в печі. Якщо первинних технічних рішень недостатньо, необхідно використовувати радикальні технічні рішення.

Радикальними технічними рішеннями, які дозволяють різко знизити викиди SO_2 з цементних печей, є використання добавок сорбенту або застосування мокрого скрубера.

Для зниження викидів SO_2 у відведених пічних газах шляхом застосування технічних рішень використовують:

- вибір сировинних матеріалів, палива і відходів (при їх використанні) з невисоким вмістом вільної сірки або сірки у вигляді сульфідів;

- добавки сорбенту (абсорбенту);

- мокрий скрубер.

Викиди оксиду та діоксиду вуглецю [1].

Визначено, що викиди CO_2 становлять 900-1000 кг/т сірого клінкеру при споживанні тепла 3500-5000 кДж/т клінкеру. Однак ця величина залежить від типу палива, що споживається. Завдяки подрібненню цементу з мінеральними домішками кількість виділеного CO_2 знижується у

перерахунку на тону цементу. Близько 62% від загальної кількості CO_2 виділяється у процесі декарбонізації вапняку сировинної суміші, а ті, що залишилися 38%, – при горінні палива. Виділення CO_2 при згорянні палива прямо пропорційні питомій витраті тепла на випал клінкеру і співвідношенню вмісту в ньому вуглецю до його теплотворної здатності. За останні 25 років виділення CO_2 при згорянні палива знизилися приблизно на 30% у зв'язку з постійним збільшенням ефективності процесів його спалювання в печі.

Виділення CO і вуглецю, зв'язаного в органічні сполуки, в процесі випалу клінкеру в печі пояснюється наявністю невеликої кількості органічних сполук у природних сировинних матеріалах (залишки організмів і рослин, що містяться у гірських породах у процесі геологічних відкладень). Перебуваючи в теплообміннику, матеріали окислюються з утворенням CO і CO_2 . У цьому процесі з органічного вуглецю також може утворитися невеликий обсяг (сліди) органічних газів. Отже, вміст CO у газах, а також слідів органічних газів, не дозволяє зробити жодних висновків про умови горіння палива в самій обертовій печі. Додаткові викиди CO можуть бути результатом неповного спалювання палива або неправильно підібраних умов горіння у декарбонізаторах. Однак таке збільшення викидів CO зазвичай збігається зі зниженням викидів оксидів азоту NO_x . В той же час такі відновлювальні умови горіння можуть сприяти утворенню та збільшенню SO_2 .

На теплоелектростанціях концентрація CO та органічно пов'язаних вуглеців у відхідних димових газах є критерієм недопалу палива. На відміну від цього процес випалу клінкеру є процесом перетворення матеріалу, який може відбуватися з надлишком повітря для поліпшення якості клінкеру. У поєднанні з тривалим перебуванням при високій температурі це сприяє повному спалюванню палива. Залежно від родовища сировинного матеріалу від 1,5 до 6 г органічного вуглецю на кг клінкеру додається у процес з природним матеріалом. Дослідження різних сировинних сумішей показали, що 85-95% органічних сполук у сировинному матеріалі перетворюються в CO_2 в присутності 3% кисню, але, в той же час, 5-15% перетворюється в CO . Кількість органічних вуглецевих сполук в цих умовах значно нижче 1%. Концентрація CO може бути вище 1000 мг/м³, перевищуючи 2000 мг/м³ або навіть, у деяких випадках, вище 5000 мг/м³. Хороша конструкція системи подачі палива забезпечує стійкий рівень живлення твердим паливом з мінімальним піком викидів. В іншому

випадку при нестехіометрії горіння можуть з'явитися короткі піки викидів CO понад 0,5%. Це створює додаткові проблеми з електрофільтрами, які змушені автоматично вимикатися для уникнення вибуху.

Для зниження вмісту CO у відхідних пічних газах застосовують:

- вибір (за можливості) сировинних матеріалів з низьким вмістом органічного вуглецю;
- оптимізацію процесу випалу шляхом підтримки необхідного коефіцієнта надлишку повітря в печі;
- однорідний склад і властивості палива, рівномірність і постійність його подачі в піч;
- стабільний режим роботи печі, застосування автоматизованих систем управління роботою печі;
- безперервне автоматичне вимірювання CO в пічних газах за допомогою використання обладнання для моніторингу з коротким часом відгуку, розташованого поблизу джерела утворення CO.

Сьогодні викиди CO₂ під час виробництва цементу відбувається через високі температури (енергозатрати) та хімічні реакції. Теоретичний перехід на відновлювальні джерела енергії міг би підвищити екологічну чистоту цементу та бетону, але хімічні реакції залишаються все ж таки неподоланим бар'єром [3].

Раніше було багато спроб знизити вуглецевий слід хімічних реакцій під час виробництва цементу. Вапняк замінювали вулканічними породами, додавали діоксид титану, харчову соду, будівельне сміття і навіть глину. Більш того, є пропозиція використовувати як основу для будівельних матеріалів картопляний крохмаль. У новому дослідженні, результати якого опубліковані в журналі *Materials Letters*, у якості добавки запропоновано спеціальним способом оброблене деревне вугілля, що отримане під час спалювання біологічних відходів. Деревне вугілля й раніше пробували додавати у суміші для виготовлення цементу. На цей раз вугілля було попередньо оброблене стічними водами, що призвело до декількох позитивних результатів. По-перше, виготовлений бетон виявився міцнішим, по-друге – підготовлене для виготовлення цементу деревне вугілля змогло поглинути із навколишнього повітря вуглекислий газ у об'ємі до 23% від власної ваги.

Експериментальний цемент з 30% обробленого стічними водами деревного вугілля поглинув на 13 г більше CO₂, ніж біло викинено при його виробництві. Для порівняння, звичайний цемент виділяє при виробництві до 900 г на

кожен кілограм. Різниця надзвичайно велика, що відкриває цікаві перспективи для нового матеріалу [3].

Вимірювання міцнісних характеристик бетону після 28 днів з моменту його виготовлення показало, що міцність бетону на стиск складає 27,6 МПа, що приблизно відповідає міцності звичайного бетону. Будинки із подібного матеріалу будуть такими ж міцними, які із звичайного бетону, але також зможуть десятиліттями поглинати CO₂ із атмосфери, а не тільки в процесі його виготовлення [3].

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Мета роботи полягає у застосуванні розробленого способу та обладнання для зниження викидів шкідливих речовин з димових газів цементного виробництва шляхом отримання конденсату водяної пари та дослідження механічних характеристик цементного каменю отриманого з його використанням.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- використати розроблений спосіб та описати будову і принцип роботи обладнання для зниження викидів шкідливих речовин з димових газів цементного виробництва;
- провести експериментальні дослідження цементного каменю отриманого згідно запропонованого способу та обладнання для зниження викидів шкідливих речовин з димових газів цементного виробництва.

Викладення основного матеріалу

Виходячи із аналізу різноманітних способів зниження викидів шкідливих речовин при виробництві цементу, це питання сьогодні є надзвичайно актуальним. Слід 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) [4].

У статті пропонується із димових газів цементного виробництва вилучати водяну пару (отримати конденсат пари димових газів). Також у процесі отримання конденсату пари з димових газів будуть вилучені механічні мікрочастинки та інші сполуки шкідливих речовин. Ці речовини знаходяться у цьому конденсаті.

Для досягнення цієї мети розроблено "Спосіб виділення рідини і механічних домішок із газового потоку" особливості якого висвітлені у патенті на корисну модель [5]. Основною дачею запропонованого способу є підвищення

ефективності очищення газу (наприклад, CO_2) у великих об'ємах від водяної пари та механічних домішок для забезпечення пропонованим способом екологічної безпеки.

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. На рисунку 1 показана функціональна схема пропонованого способу.

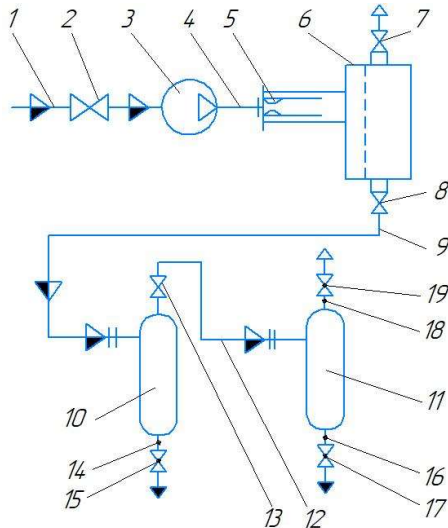


Рис. 1. Функціональна схема лабораторно-експериментальної установки для виділення рідини і механічних частинок з газового потоку:

- 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

Спочатку гарячий газовий потік перед поступленням в буферну камеру охолоджується у сопловій камері (за рахунок надзвукової швидкості) де внаслідок охолодження пара перетворюється в дрібнодисперсні краплини рідини. Далі газоріднинний потік поступає в каскад сепараторів, де краплинна рідина і механічні частини осаджуються та виводяться через нижні вихідні патрубкі сепараторів, а очищений газ виводиться через верхній патрубок кінцевого сепаратора.

Залежно від способу охолодження димового газу можна також додатково очистити його від механічних домішок, пилу тощо. Конденсат пари димових газів потрібно в подальшому утилізувати або за можливості повторно використати у технологічному процесі.

Для реалізації пропонованого способу розроблено багатосопловий пристрій [6] та газоріднинний сепаратор із врахуванням складу та різних характеристик димових газів цементного виробництва. На рисунку 2 показано лабораторно-експериментальний газоріднинний сепаратор в процесі його досліджень, а на рисунку 3 – його принципову схему.



Рис. 2. Лабораторно-експериментальний газоріднинний сепаратор

Принцип роботи сепаратора наступний. Газоріднинна суміш потрапляє у вхідний патрубок 4, далі входячи у корпус сепаратора 1 змінює свій напрямок за рахунок дефлектора 7. При цьому відбувається закручування газоріднинного потоку та його тангенційний рух по внутрішній поверхні корпуса 1. При цьому, як за рахунок зміни напрямку руху та дії відцентрової сили, відбувається коагуляція краплин рідини та її відділення з газового потоку. Рідина, що відділилась на цих ступенях розділення, продовжує рух як тангенційно, так і стікає в днище 3 сепаратора. Для відбору рідини, що ще 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, які 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, також поступають у днище 3.

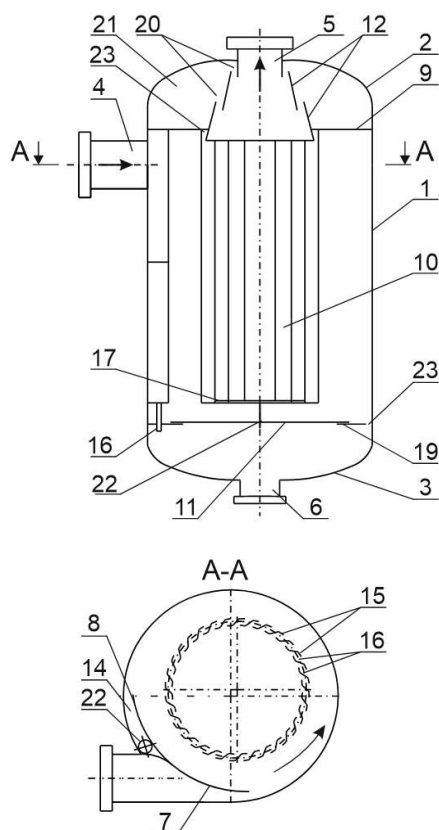


Рис. 3. Принципова схема газорідинного сепаратора:

- 1 – корпус; 2, 3 - днище; 4 – вхідний патрубок, 5 – вихідний патрубок; 6 – зливний патрубок; 7, 8 – дефлектор; 9 – перегородка; 10 – сепараційний пакет; 11 – перегородка нижня; 12 – нижній конфузор; 13 – верхній конфузор; 14, 23 – «кишені-уловлювачі»; 15 – пластини; 16 – щілини; 17 – нижній диск; 18 – напрямна вісь; 19 – кутник кріплення нижньої перегородки; 20 – кільцева щілина; 21 – камера; 22 – дренажна трубка; 24 – щілина між копусом і нижньою перегородкою

Легка рідинна плівка, що залишилася у кишені-уловлювачі 23, поступає разом з потоком суміші в зону вихідних конфузорів 12 і 13. Рухаючись у напрямку газового потоку вгору по поверхні конфузорів 12 і 13, рідина потрапляє в щілини 20, звідки осідає у верхній накопичувальній камері 21, з якої під дією гравітаційних сил за допомогою дренажної трубки 22 відводиться 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, що знаходиться у днищі 3 відбирається з сепаратора через зливний патрубок 6.

З метою утилізації отриманого конденсату пари з димових газів цементного виробництва пропонується використовувати його як сировину для отримання цементного каменю (додавати у

цементний розчин при виробництві бетону та виробів з нього).

Для визначення механічних характеристик цементного каменю (напруження згину σ_{zg} , стиску $\sigma_{ст}$ та крихкість КК) виготовленого із застосуванням конденсату пари димових газів цементного виробництва та їх порівняння із цементним каменем виготовленим за традиційним способом було виготовлено відповідні дослідні зразки. Визначення характеристик цементного каменю проводилось згідно ДСТУ Б В.2.7-86-99 [7].

Результати лабораторних досліджень цементних каменів наведені у таблиці.

Таблиця

Характеристики цементних каменів

| № з/п | Цементний камінь виготовлений на основі | Розтічність Р, мм | σ_{zg} , МПа | $\sigma_{ст}$, МПа | Крихкість КК = $\sigma_{ст}/\sigma_{zg}$ | Тривалість формування, год |
|-------|---|-------------------|---------------------|---------------------|--|----------------------------|
| 1 | Конденсату пари димових газів (відстояний) | 220 | 1,2 | 4,7 | 3,9 | 24 |
| 2 | Конденсату пари димових газів (перемішаний) | 215 | 1,3 | 4,6 | 3,5 | |
| 3 | Водопровідної води | 205 | 1,0 | 3,5 | 3,5 | |

Виходячи із отриманих результатів (табл.) найкращим за механічними властивостями є цементний камінь, отриманий із застосуванням конденсату пари димових газів. Варта зауважити, що перед виготовленням дослідних зразків вищезазначений конденсат пари перемішувався із наявним у ньому осадом. Отриманий цемент має більшу розтічність порівняно із цементом виготовленим на водопровідній воді, а цементний камінь вищі напруження згину на 30% та вищі на 31% напруження стиску. При цьому, крихкість цементного каменю виготовленого із перемішаного конденсату пари димових газів залишилась такою ж, як і у цементного каменю виготовленого з використанням водопровідної води.

Висновки. Технологічні процеси виробництва будівельних матеріалів, зокрема цементу, супроводжуються значними викидами шкідливих речовин у навколишнє середовище. З метою утилізації окремих видів шкідливих речовин, що

знаходяться у димових газах цементних виробництв, було розроблено обладнання та спосіб, який полягає у вилученні водяної пари (отримання конденсату пари димових газів). Варта зауважати, що окрім водяної пари, яка належить до парникових газів, розроблений спосіб дозволяє вилучати також механічні мікрочастинки та інші сполуки шкідливих речовин. Утилізація отриманого конденсату пари димових газів полягає у його застосуванні для виготовлення виробів із цементу.

Для визначення механічних характеристик цементного каменю (напруження згину σ_{zg} , стиску $\sigma_{ст}$ та крихкості K_K) виготовленого із застосуванням конденсату пари димових газів та їх порівняння із цементним каменем виготовленим за традиційним способом було виготовлено відповідні дослідні зразки та проведено експериментальні дослідження. Найкращими механічними властивостями володіє цементний камінь, отриманий із застосуванням конденсату пари димових газів. Отриманий цемент має більшу розтічність порівняно із цементом виготовленим на водопровідній воді, а цементний камінь – вищі напруження згину на 30% та вищі на 31% напруження стиску. При цьому, крихкість цементного каменю виготовленого із перемішаного конденсату пари димових газів залишилась такою ж, як і у цементного каменю виготовленого з використанням водопровідної води.

Література

1. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. Цементна промисловість / с.в. Плашихін. – К.: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. – 96 с.
2. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau. – 2013. – 501 p.
3. <https://toneto.net/news/tehnologii/uchyonie-sozdali-tsement--kotoriy-pogloshchaet-bolshe-uglekislogogaza--chem-vibrasivaetsya-pri-ego-proizvodstve>
4. <http://surl.li/kxpwo>
5. Патент на корисну модель № 152837, Україна, В03С 3/02. Спосіб виділення рідини і механічних частинок з газового потоку / Патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (UA), вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019 (UA) // Крижанівський С.І. (UA); Лях М. М. (UA); Михайлюк В. В. (UA); Маковійчук М.В. (UA); Кучірка Ю.М. (UA); Витриховський Є.А. (UA) – u202200306; Заявл. 25.01.2022; Опубл. 19.04.2023, Бюл. № 16. – 4 с.
6. Лях М.М., Михайлюк В.В., Яцишин Т.М., Витриховський Є.А. (2022). Дослідження впливу геометричних параметрів сопла Лавалля на зміну температури потоку газу. Прикарпатський вісник наукового товариства імені Шевченка. Число, 17(64), 108-117. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17\(64\)-108-117](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117)
7. ДСТУ Б В.2.7-86-99. Цементи тампонажні. Методи випробувань (ГОСТ 26798.1-96)

References

1. Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. Tsementna promyslovist / s.v. Pla-shykhin. – K.: Tsentр resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva, 2020. – 96 p.
2. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau. – 2013. – 501 p.
3. <https://toneto.net/news/tehnologii/uchyonie-sozdali-tsement--kotoriy-pogloshchaet-bolshe-uglekislogogaza--chem-vibrasivaetsya-pri-ego-proizvodstve>
4. <http://surl.li/kxpwo>
5. Patent na korysnu model № 152837, Ukraina, V03S 3/02. Sposib vydilennia ridyny i me-khanichnykh chastynok z hazovoho potoku / Patentovlas-nyk Ivano-frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi univer-sytet nafty i hazu (UA), vul. Karpatska, 15, m. Ivano-Frankivsk, 76019 (UA) // Kryzhanivskiy Ye.I. (UA); Liakh M. M. (UA); Mykhailiuk V. V. (UA); Ma-koviichuk M.V. (UA); Kuchirka Yu.M. (UA); Vytrykhovskiy Ye.A. (UA) – u202200306; Zaiavl. 25.01.2022; Opubl. 19.04.2023, Biul. № 16. – 4 p.
6. Liakh M.M., Mykhailiuk V.V., Yatsyshyn T.M., Vytrykhovskiy Ye.A. (2022). Doslidzhennia vplyvu heometrychnykh parametriv sopla Lavalia na zminu temperatury potoku hazu. Prykarpatskyi visnyk naukovoho tovarystva imeni Shevchenka. Chyslo, 17(64), 108-117. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17\(64\)-108-117](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117)
7. DSTU B V.2.7-86-99. Tsementy tamponazhni. Metody vyprobuvan (GOST 26798.1-96)

Mykhailiuk V.V. Laboratory experimental installation for obtaining flue gas condensate and its disposal

Currently, cement is one of the main building materials used in the construction of various engineering structures and structures. The technological process of cement production is multi-stage and requires a high production culture to ensure environmental safety. The

full cycle of commercial cement production has a negative impact on the environment: global warming (due to greenhouse gas emissions), ocean acidification (mainly due to emissions of carbon, nitrogen, and sulfur oxides), land degradation (due to heavy metal contamination). There are various ways of making cement, which differ technologically and usually have different effects on the environment. Therefore, it remains important to study the main types of emissions during cement production and measures to reduce or eliminate their impact on the environment. The main problems during the production of cement are the reduction of emissions of water vapor, dust, nitrogen oxides NO_x , sulfur dioxide, oxide and carbon dioxide. Various equipment are used to clean or reduce such pollution: electrostatic precipitators, bag filters, hybrid filters, wet scrubbers, etc. However, the use of the above-mentioned equipment does not completely eliminate harmful emissions during cement production. The work proposes a method and equipment for reducing the emissions of harmful substances from the flue gases of cement production - a method of separating liquid and mechanical impurities from the gas flow. The main task of the proposed method is to increase the efficiency of gas purification in large volumes from water vapor and mechanical impurities to ensure environmental safety,

which consists in extracting water vapor (obtaining flue gas vapor condensate). In order to dispose of the condensate of flue gases, it is proposed to use it in the production of concrete. Experimental studies of cement stone obtained using the steam condensate of cement production flue gases have been carried out. At the same time, the mechanical characteristics of the obtained cement stone (flexural stress σ_{Σ} , compression σ_{cm} and fragility K_R) were determined and compared with the cement stone produced by the traditional method. It was established that the best mechanical properties are the cement stone obtained with the use of condensate of flue gas steam.

Key words: cement, harmful emissions, gas-liquid separator, flue gas vapor condensate, cement stone, concrete, disposal

Михайлюк Василь Володимирович к. т. н., доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 09.10.2023.