

**АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ АБСОРБЕРІВ**

**М. М. Лях, В. В. Михайлюк, В. Р. Процюк, Р. О. Дейнега,  
А. В. Петринка, О. Я. Фафлей**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
тел. 0978984786, e-mail: myhajlyukv@ukr.net*

*Виробництво цементних сумішей супроводжується значними викидами шкідливих речовин: утворення оксидів азоту, викидів пилу із печей, клінкерних холодильників і млинів для помолу сировинних матеріалів, водяної пари, діоксиду сірки, оксиду та діоксиду вуглецю, тощо. Ці викиди завдають значної шкоди навколишньому середовищу. Незважаючи на сучасні технології та обладнання, що застосовується для усунення негативного впливу цементного виробництва на навколишнє середовище, повністю усунути його неможливо. Тому уловлювання, зберігання та подальше застосування шкідливих елементів як сировини, що знаходяться у димових газах цементних підприємств сьогодні є важливим завданням. У роботі проаналізовано основні джерела шкідливих викидів під час виробництва цементу та існуючі способи їх зменшення. Акцентовано увагу на застосуванні методу абсорбції та механізмів його використання. Проведено критичний аналіз існуючих типів тарілчастих та насадкових абсорберів, проаналізовано конструкції промислових масообмінних насадок, які забезпечують інтенсифікацію процесу масообміну, зменшення гідравлічного опору, зниження енерговитрат тощо. Під час проектування для подальшої роботи абсорберів важливою є оцінка їх ефективності, що включає характеристику інтенсивності процесу й гідравлічного опору. Підбір абсорбера для кожної конкретної задачі повинен проводитись у результаті техніко-економічних розрахунків, проведених для декількох конкуруючих типів. При цьому потрібно враховувати простоту виготовлення, витрату металу й інших матеріалів, вартості, зручності в експлуатації тощо.*

**Ключові слова:** цементне виробництво, димові гази, шкідливі викиди, водяна пара, пил, абсорбція.

**Вступ**

Однією з причин глобального потепління є парниковий ефект на які впливають парникові гази, одним із яких є діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>). Тому першочерговим міжнародним завданням є прийняття заходів щодо зменшення викидів CO<sub>2</sub> в навколишнє середовище. Сьогодні актив-

но інвестуються розробки методів уловлювання та зберігання CO<sub>2</sub>, що містяться у газоподібних продуктах згорання.

Однією з галузей, де спостерігається великий викид парникових газів у навколишнє середовище, є – цементна. Розташування цементного підприємства залежить від сировинної бази, природних умов місцевості, об'ємів споживчої аудиторії. Важливим фактором розвитку виробництва є екологічна ємність регіону – можливість зменшувати вплив промислової діяльності на екосистему. Незважаючи на сучасні технології та обладнання, що використовується на цементному виробництві все ж таки відбувається забруднення атмосферного, гідросферного та агросередовища. Виробництво цементу супроводжується викидами у навколишнє середовище твердих і газоподібних забруднюючих речовин (цементного пилу, діоксиду вуглецю, водяної пари, оксидів азоту тощо). Викиди підприємства негативно впливають на стан атмосферного повітря, супроводжують утворення смогу, кислотних дощів.

Отже, уловлювання, зберігання та подальше застосування шкідливих елементів, що знаходяться у димових газах цементних підприємств сьогодні є важливою задачею.

#### **Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій**

Для уловлювання шкідливих елементів із димових газів сьогодні застосовують багато різноманітних способів, технологій та обладнання. Наприклад, для зменшення викидів пилу із печей, клінкерних холодильників і млинів для помолу сировинних матеріалів, цементу та вугілля, а також допоміжного обладнання використовують: сучасні електрофільтри або рукавні фільтри, оптимізовані для очищення конкретного виду газів; гібридні фільтри; системи управління ремонтом, спеціально спрямованої на спостереження за станом фільтрів.

Для зменшення викидів пилу, що утворюється в процесі складування та переробки сировинних матеріалів, палива і клінкеру, а також будь-які транспортні засоби, що використовуються на території виробництва застосовують: укриття/капсулювання операцій, пов'язаних з виділенням пилу; закриті конвеєри та елеватори; зменшення місць підсмоктування повітря або просипання матеріалу, герметизація установок; гнучкі шланги та рукави, забезпечені 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 [1].

На цементному виробництві існує два джерела утворення оксидів азоту (NO<sub>x</sub>):

1) теплові NO<sub>x</sub>: частина азоту в повітрі під час горіння взаємодіє з киснем з утворенням оксидів азоту;

2) паливні NO<sub>x</sub>: сполуки, які містять азот, хімічно зв'язані в паливі, реагують з киснем повітря з утворенням різних оксидів азоту.

Для зниження викидів  $\text{NO}_x$  застосовуються як первинні технічні рішення, інтегровані в технологічний процес, так і спеціальні технології або їх поєднання з первинними технічними рішеннями: оптимізація процесу випалу; охолодження полум'я факела; застосування пальників з низьким виділенням  $\text{NO}_x$ ; постадійне спалювання палива, спалювання палива в середній частині печі; використання мінералізаторів; технологія селективного некаталітичного відновлення  $\text{NO}_x$  (SNCR); технологія селективного каталітичного відновлення  $\text{NO}_x$  (SCR) [1].

Для зниження викидів  $\text{NO}_x$  у відведених пічних газах використовують: оптимізацію процесу випалу; охолодження полум'я факела; пальники з низьким виділенням  $\text{NO}_x$ ; 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 ( $\text{SO}_2$ ).** Зниження викидів діоксиду сірки при виробництві цементу здійснюється по стадійно [1]. Першим кроком зниження викидів  $\text{SO}_2$  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 [1].

Для зниження викидів  $\text{SO}_2$  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 скруббер.

#### **Викиди оксиду та діоксиду вуглецю.**

Для зниження вмісту  $\text{CO}$  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  $\text{CO}$  в пічних газах за допомогою використання обладнання для моніторингу з коротким часом відгуку, розташованого поблизу джерела утворення  $\text{CO}$  [1].

Викиди  $\text{CO}_2$  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 [1].

**Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання**

Мета роботи полягає у аналізі існуючих типів тарілчастих і насадкових колон та конструкцій промислових масообмінних насадок, що використовуються у абсорберах і забезпечують інтенсифікацію процесів масообміну та зниження енерговитрат.

Для досягнення мети необхідно:

- проаналізувати існуючі типи тарілчастих і насадкових колон та конструкцій промислових масообмінних насадок, що використовуються у абсорберах;

- сформулювати вимоги щодо вибору абсорберів.

**Викладення основного матеріалу**

Для очищення димових газів, що продукуються цементними виробництвами, пропонується застосовувати метод абсорбції. У основі цього методу лежить масообмін – перехід речовини з газоподібної фази у рідину через поверхню розподілу обох фаз, або ж поглинання газів чи парів із газових чи парогазових сумішей рідкими поглиначами, які називаються абсорбентами. Можливість здійснення процесу абсорбції заснована на розчинності газів у рідинах. Процес абсорбції є вибірко-вим та зворотним, що дає можливість застосовувати його не тільки з метою одержання розчинів газу в рідинах, а також і для розділення газових і парових сумішей [2]. Абсорбентами служать рідини або розчини активного компонента у рідкому розчиннику.

До абсорбентів висувають ряд вимог, серед яких найбільш суттєвими є: висока абсорбційна здатність, селективність, низький тиск пари, хімічна інертність до поширених конструкційних матеріалів, нетоксичність, вогне- та вибухобезпечність, доступність та невисока вартість.

Для абсорбції газових забруднювачів найчастіше застосовують тарілчасті і насадокові колони.

Тарілчасті абсорбери це вертикальні циліндри – колони, усередині яких на певній відстані один від одного по висоті колони розміщуються горизонтальні перегородки-тарілки. Тарілки слугують для збільшення поверхні контакту фаз при спрямованому русі цих фаз (рідина тече згори вниз, а газ проходить знизу вгору) і в багаторазовій взаємодії рідини з газом. На кожній тарілці, залежно від її конструкції, можна підтримувати той чи інший вид руху фаз, звичайний перехресний струм або повне перемішування рідини.

Тарілки можна класифікувати на три основні групи:

– перехресного типу, у яких рух газу й рідини здійснюється перехресним струменем. Ці тарілки мають спеціальні переливні пристрої для перетікання рідини з однієї тарілки на іншу, причому газ по переливах не проходить.

– провального (беспереливного) типу, у яких переливні пристрої відсутні, так що газ і рідина проходять через ті самі отвори. На цих та-

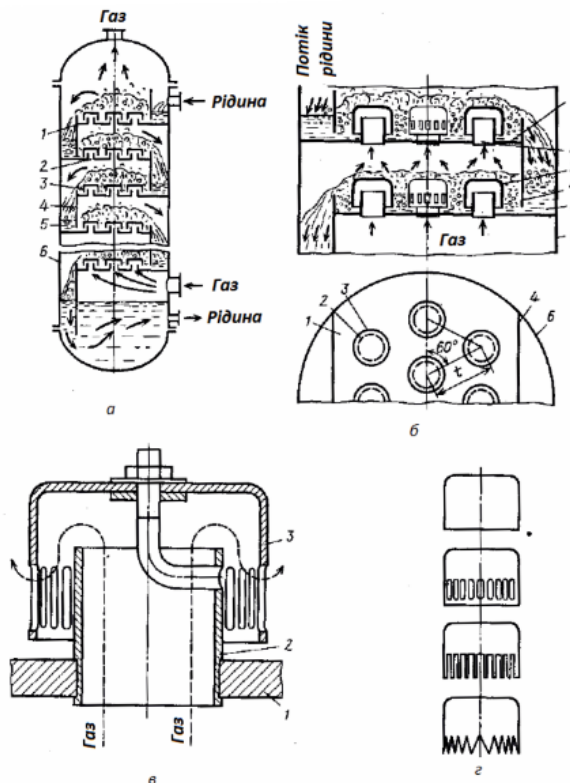
рїлках контакт газу й рїдини здїйснюється за схемою повного перемїшування рїдини.

– з односпрямованим рухом газу й рїдини (прямотїчні). У цьому випадку газ виходить із отворїв у напрямку руху рїдини по тарїлці: це викликає зниження поздовжнього перемїшування рїдини й сприяє руху рїдини, що приводить до зменшення гїдравлїчного градієнта.

За способом зливу рїдини з тарїлки абсорбери цього типу подїляються на колони з тарїлками зі зливними пристроями й з тарїлками без зливних пристроїв (з неорганізованим зливом рїдини). До тарїлчастих апаратів зі зливними пристроями вїдносяться колони з ковпачковими, ситчастими, клапанними й їншими тарїлками. Вони мають спеціальні приспособлення для перетїкання рїдини з однїєї тарїлки на їншу – зливнї трубки, кишенї тощо. Нижнї кїнци зливних пристроїв зануренї в рїдину на нижчерозташованих тарїлках для створення гїдрозасуви, що запобїгає проходженню газу через зливний пристрій. Принцип роботи абсорберїв такого типу на прикладї колони з капсульними ковпачковими тарїлками показаний на рисунку 1, а. Рїдина подається на верхню тарїлку, рухається уздовж тарїлки вїд одного зливного обладнання до їншого, перетїкає з тарїлки на тарїлку й виводиться з нижньої частини абсорбера. Переливнї пристрої на тарїлках розташовують таким чином, щоб рїдина на сусїднїх по висотї апарата тарїлках протїкала у взаємно протилежних напрямках. Газ надходить у нижню частину абсорбера, проходить через прорїзи (рис. 1, в) ковпачкїв (в їнших абсорберах через отвори, щїлини тощо) й потїм попадає в шар рїдини на тарїлці, висота якого регулюється в основному висотою зливного порога. При цьому газ у рїдинї розподїляється у виглядї бульбашок ї струменїв, утворюючи в нїй шар пїни, у якїй вїдбуваються основнї процеси массо- ї теплопереносу. Ця пїна нестабїльна, ї при пїдходї її до зливного пристрою рїдина очищається. Пройшовши через усї тарїлки, газ виходить з верхньої частини апарата [3].

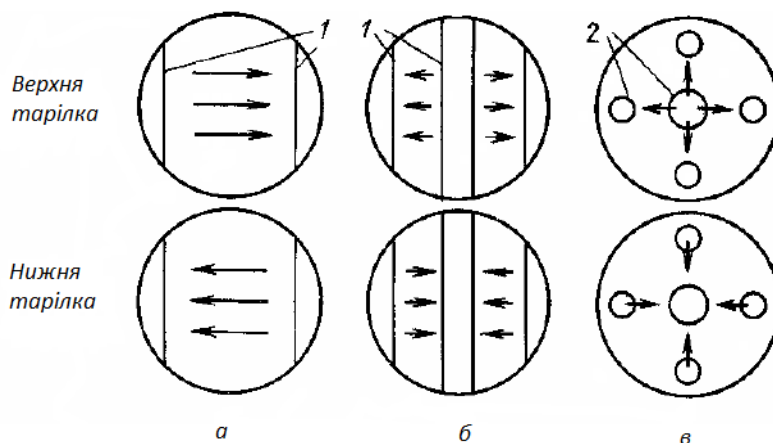
Для тарїлчастих колон зі зливними пристроями характерна гїдродинамїчна нерївномїрнїсть, яка є наслїдком гїдравлїчного опору руху рїдини за довжиною тарїлки. Ця нерївномїрнїсть пояснюється тим, що при русї рїдини по тарїлці її рївень пїдвищується (наприклад, через наявнїсть ковпачкїв або пїд дїєю перпендикулярного потоку минаючого через рїдину газу), ї за довжиною шляху руху рїдини виникає гїдравлїчний градієнт. Таке явище приводить до нерївномїрного розподїлу газу по площї тарїлки: бїльша частина газу рухається через частину тарїлки, що прилягає до зливного порогу, де рївень рїдини нижче, що стає особливо помїтним на тарїлках бїльших дїаметрїв, коли величина гїдравлїчного градієнта висока.

Для зниження гїдравлїчного градієнта в апаратах великого дїаметра (бїльше 1 м) зменшують шлях проходження рїдини (рис. 2, б, в).



а – колона з тарілками; б – дві сусідні тарілки; в – капсульний ковпачок;  
 г – форми капсульних ковпачків; 1 – тарілки; 2 – газові патрубки; 3 – круглі ковпачки; 4 – перетічні перегородки з порогами; 5 – гідравлічні засуви;  
 б – корпус колони.

Рис. 1. Конструкція колони і тарілок з капсульними ковпачками



а – однопотічний зі зливними перегородками 1; б – двопотічний зі зливними перегородками 1; в – для радіального напрямлення рідини з переливними трубами 2.

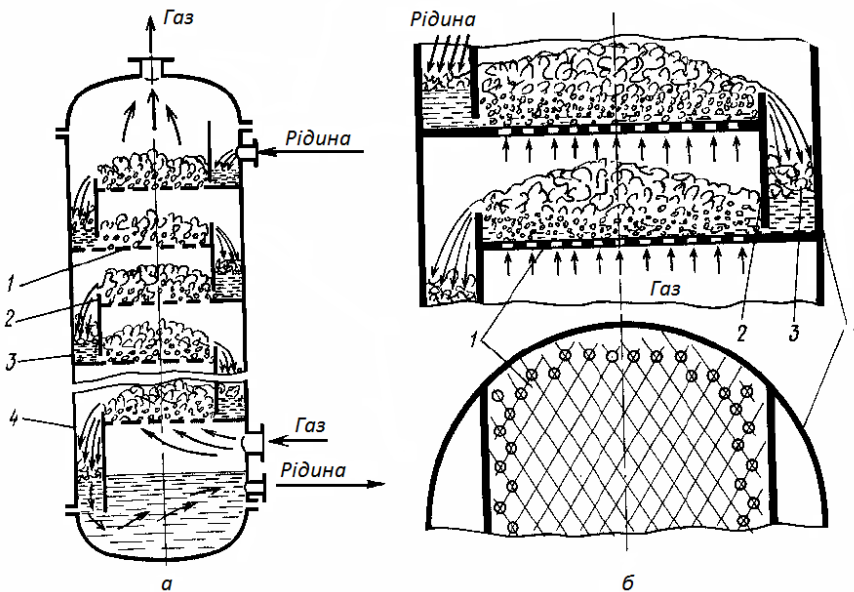
Рис. 2. Схеми зливних пристроїв тарілчастих колон

Залежно від швидкості газу розрізняють три основні гідродинамічні режими роботи тарілчастих апаратів: бульбашковий, пінний і струминний (або інжекційний). Ці режими різняться структурою газорідного шару на тарілці, яка в основному визначає його гідравлічний опір, висоту й поверхню контакту на тарілці. Вибрати оптимальне контактне обладнання з великої різноманітності типів тарілок досить складно [3].

Ковпачкові тарілки стабільно працюють при значних змінах навантажень за газом й рідиною. Цей показник дуже важливий при організації процесу у виробничих умовах. Але недоліки ковпачкових тарілок досить істотні – вони складні за конструкцією, для їх виготовлення потрібно більше металу, вони мають більший гідравлічний опір і малу гранично допустиму швидкість газу. Тому колони з ковпачковими тарілками замінюють ефективнішими конструкціями тарілчастих апаратів.

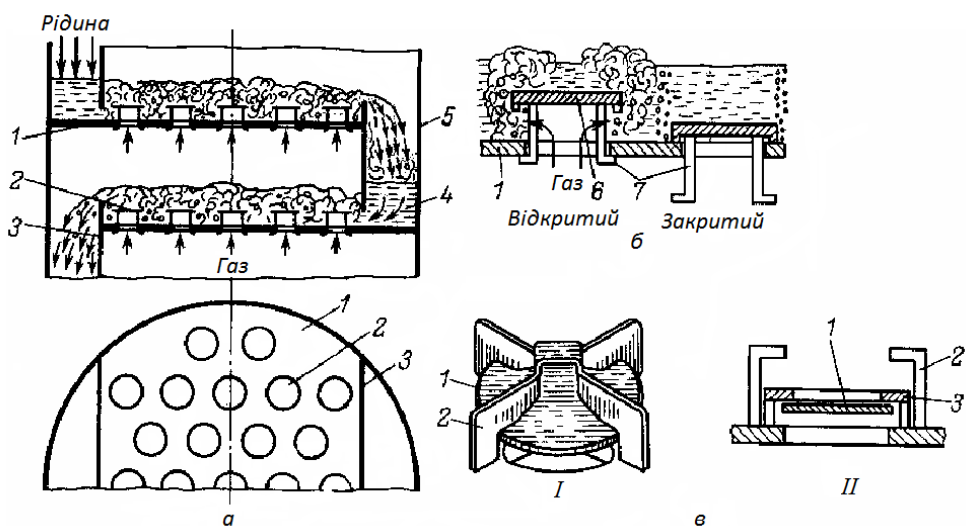
Ситчасті тарілки (рис. 3) мають велику кількість отворів діаметром 2...8 мм, через які проходить газ у шар рідини. Рівень рідини на тарілці підтримується переливним пристроєм 2.

При занадто малій швидкості газу його тиск не може утримати шар рідини, відповідний до висоти переливу, і рідина може просочуватися (провалюватися) через отвори тарілки на нижчерозташовану тарілку, що приводить до істотного зниження рушійної сили процесу абсорбції. Тому газ повинен рухатися з певною швидкістю й мати тиск, достатній для того, щоб подолати тиск шару рідини і запобігти просочуванню рідини через отвори тарілки [3]. Таким чином, ситчасті тарілки мають більш вузький діапазон роботи порівняно з ковпачковими.



а – колона з тарілками; б – дві сусідні тарілки; 1 – тарілки; 2 – претічні перегородки або труби з порогами; 3 – гідравлічні засуви; 4 – корпус колони.

Рис. 3. Конструкція колони з ситчастими перетічними тарілками



а – дві сусідні тарілки з круглими клапанами; б – принцип роботи клапана; 1 – тарілка; 2 – клапан; 3 – перетична перегородка з порогом; 4 – гідравлічний засув; 5 – корпус колони; 6 – диск клапана; 7 – обмежувач підйому клапана; в – круглі клапани з верхнім обмежувачем (I) і з баластом (II): 1 – дисковий клапан; 2 – обмежувач; 3 – баласт.

Рис. 4. Конструкція клапанних тарілок

До переваг ситчастих тарілок відносяться простота їх конструкції, легкість монтажу й ремонту, порівняно низький гідравлічний опір, досить висока ефективність. Однак ці тарілки чутливі до забруднень і осаду, які забивають їх отвори. Якщо відбувається раптове припинення подачі газу або істотне зниження його тиску, то із ситчастих тарілок зливається вся рідина, і для поновлення нормальної роботи апарата необхідно знову запускати колону.

Принцип дії клапанних тарілок (рис. 4, а) полягає в тому, що клапан 2, що вільно лежить над отвором у тарілці 1, зі зміною витрати газу збільшує підйом і відповідно площу зазору між клапаном і її площиною для проходу газу. Тому швидкість газу в цьому зазорі, а значить і у вході в шар рідини на тарілці, залишається приблизно сталою, що забезпечує незмінно її ефективну роботу. Гідравлічний опір тарілки при цьому збільшується незначно. Висота підйому клапана регулюється висотою обмежувача 7 (рис. 4, б). Діаметр отворів під клапаном становить 35...40 мм, а діаметр самого клапана 45...50 мм.

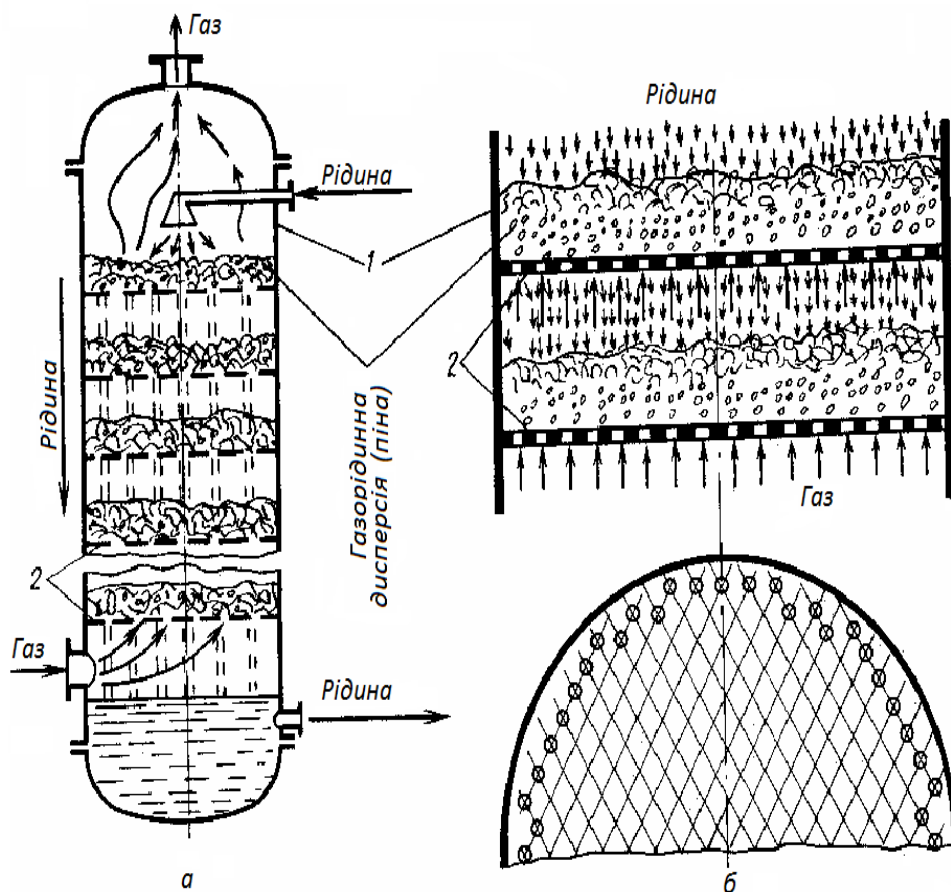
У тарілці без зливних пристроїв (рис. 5) газ і рідина проходять через ті самі отвори або щілини. При цьому одночасно із взаємодією фаз на тарілці відбувається стікання рідини на нижчерозташовану тарілку (провалювання рідини). Тому тарілки такого типу часто називають провальними. Конструкції (типи) провальних тарілок зображені на рис. 7.



Гідродинамічні режими роботи провальних тарілок особливі тим, що їх нормальна робота можлива тільки після досягнення певної швидкості газу. Діаметр отворів у цих тарілках переважно рівний 10 мм, іноді 15...20 мм. Це дозволяє суттєво збільшити навантаження по рідині та газу при незначному гідравлічному опорі. Сумарна площа вільного перерізу становить 10...15 % від загальної.

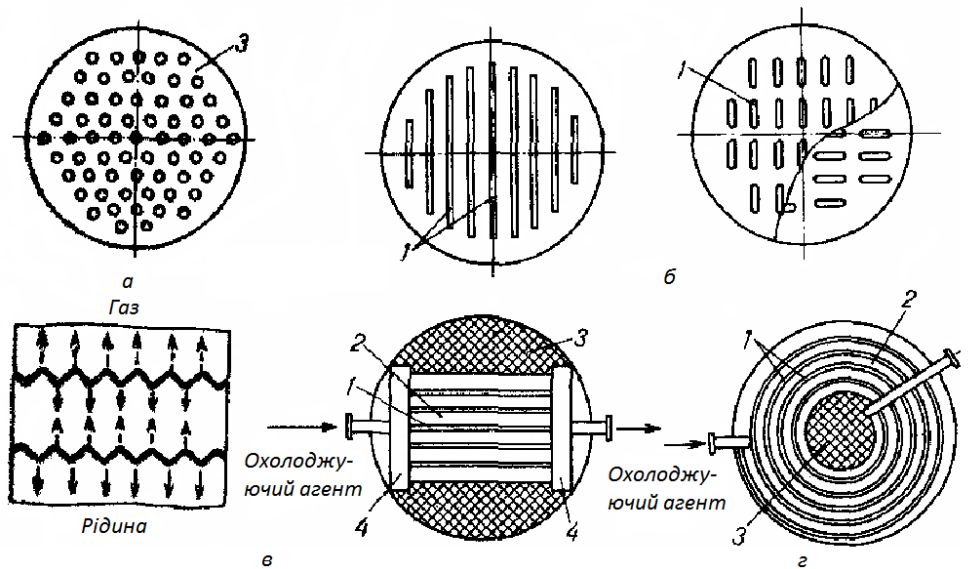
У решітчастих тарілках щілини зазвичай виштампувані та мають ширину 3... 8 мм (рис. 6, б). Хвилясті тарілки виготовляють гофруванням металевих листів з отворами (рис. 6, в). У цих тарілках злив рідини в основному відбувається через отвори в нижніх вигинах тарілки, а газ проходить через її верхні вигини. Така конструкція провальних тарілок збільшує час їх стійкої роботи [3].

За ступенем очищення викидів від газоподібних забруднювачів усі конструкції тарілок приблизно однакові. Тарілчасті колони мають стандартизований ряд діаметрів від 400 до 4000 мм.



а – колона з провальними тарілками; б – дві сусідні провальні тарілки;  
1 – колона; 2 – тарілка.

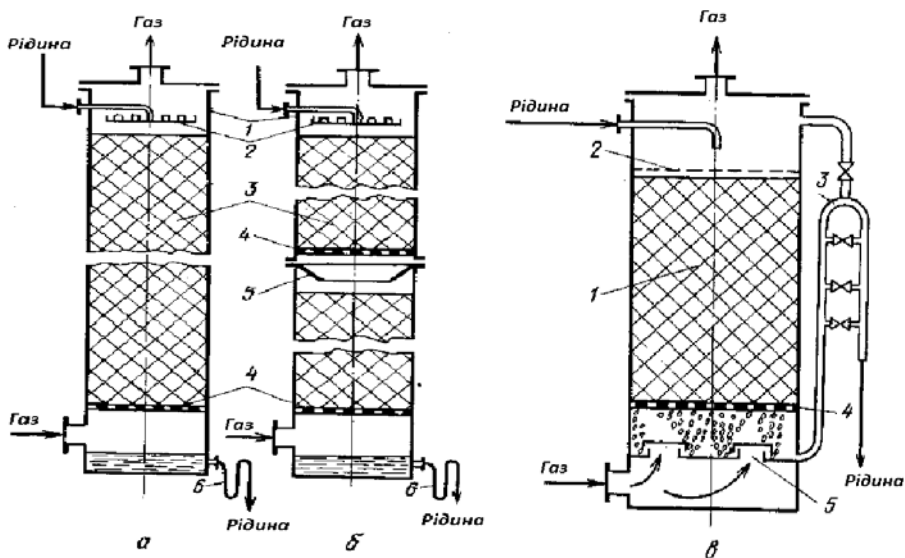
Рис. 5. – Конструкція колони і провальних тарілок



а – з круглими отворами; б – решітчаста; в – хвиляста; г – трубчаста:  
 1 – листи; 2 – труби; 3 – перфорований лист; 4 – колектори.

Рис. 6.– Провальні тарілки

Найпоширенішими є насадкові абсорбери (рис. 7), які є колонами заповненими всередині насадками різної форми.



а – із суцільним шаром насадки; б – із секційним завантаженням насадки:  
 1 – корпус; 2 – розподілювач рідини; 3 – насадка; 4 – опорні решітки;  
 5 – перерозподілювач рідини; 6 – гідравлічні засувки; в – емульгаційна насадкова колона: 1 – насадка; 2 – сітка фіксуєюча; 3 – гідравлічна засувка;  
 4 – опорна решітка; 5 – розподілювач газу.

Рис. 7. Схеми насадкових абсорберів

У насадкових колонах забезпечується кращий контакт оброблюваних газів з абсорбентом, завдяки чому інтенсифікується процес масо-передачі і зменшуються габарити очисних пристроїв.

Насадки повинні відповідати наступним вимогам: мати високу ефективність, малу матеріаломісткість, корозійну стійкість, технологічність виготовлення, зручність завантаження і вивантаження, малу затримку рідини, протидію забрудненню продуктами великої молекулярної маси тощо [1].

При виборі насадки необхідно враховувати наступні конструктивні та технологічні параметри: форму та розмір, вільний об'єм, поверхню одиниці об'єму, висоту еквівалентної теоретичної ступені контакту або висоту одиниці переносу, величину гідравлічного опору, утримуючу здатність за рідиною, здатність забезпечення рівномірного розподілу фаз за перерізом шару, змочуваність насадки. Хоча ефективність насадкового апарату залежить насамперед від конструкції насадки, важливе значення мають пристрої, які забезпечують рівномірний розподіл рідини і газу за площиною перерізу апарату (розподільники, опорні грати).

Насадки виготовляють з металу, кераміки, пластмас, скла, склопластику. За способом виготовлення елементи насадки бувають штамповані, литі, прокатані, отримані методом екструзії. Змочуваність насадки залежить від насадки матеріалу, її контактної поверхні (шорсткості, наявності прорізів, виступів тощо).

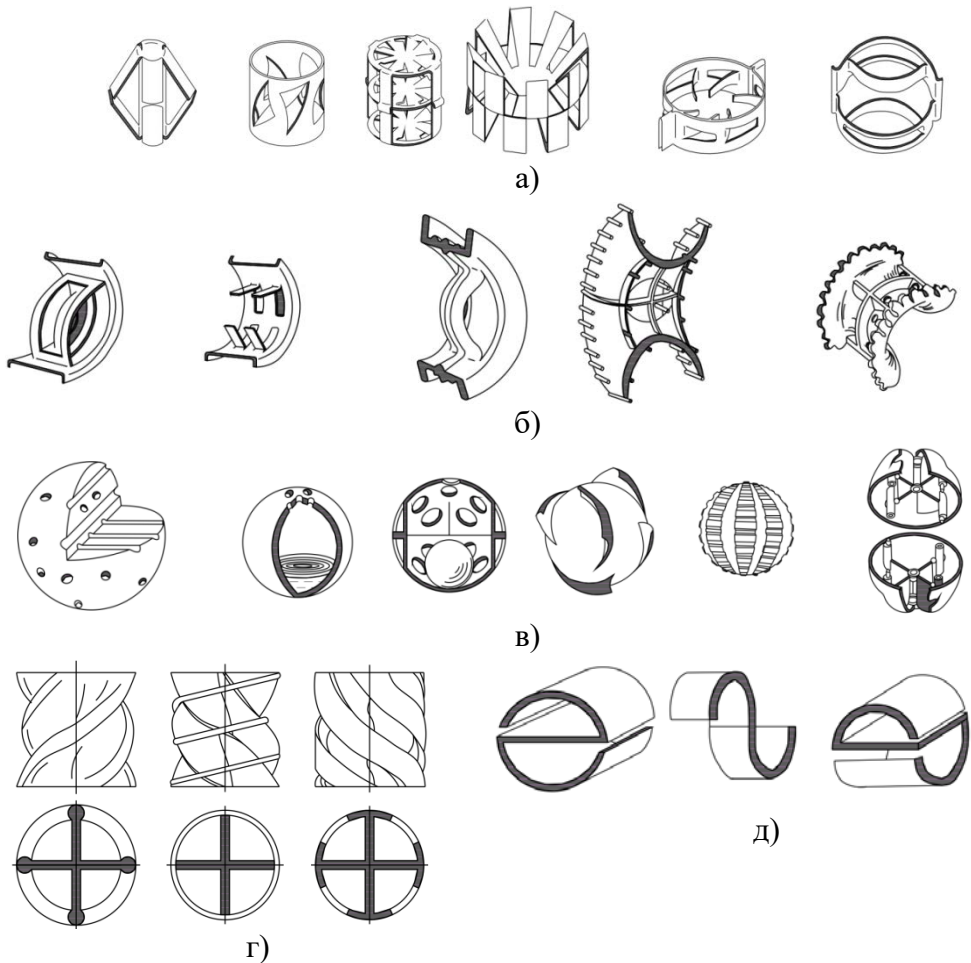
Промислове застосування циліндричних насадок почалося приблизно в 1950-1970 роках тому, коли Ф. Рашиг розробив насадку, що отримала назву «кільця Рашига». Вона виготовлялася з кераміки, порцеляни, металу, пластмаси. Металеві кільця – відрізки труб, висота яких дорівнювала зовнішньому діаметру. Кільця Рашига встановлюють у колоні правильними рядами або насипають. Низька вартість цього типу насадки, доступність матеріалу для виготовлення забезпечує широке використання кільця Рашига в наш час.

Подальший розвиток циліндричних насадок відбувався шляхом підвищення інтенсифікації процесу масообміну, зменшення гідравлічного опору, зниження енерговитрат на проведення виробничих процесів, тобто шляхом створення таких конструкцій насадок, у яких опір руху потоку газу був би значно нижчий, ніж у кільця Рашига. З'явилися насадки із ребристою зовнішньою, зовнішньою і внутрішньою поверхнями; насадки виготовлені із сітчастого матеріалу; насадки із перфорованою поверхнею (отвори круглі, овальні, багатогранні, фасонні). Для інтенсифікації процесу масообміну стали створювати конструкції циліндричних насадок з перегородками діаметрально розташованими, хрестоподібними тощо.

Насадки, виготовлені із металу, циліндричні стінки якої надрізані і козирки отворів відігнуті всередину (кільця Палля), одержали світове

визнання. Кільця Палля при зіставленні із кільцями Рашига мають відповідно на 15-20% більш високу пропускну здатність, у 1,5-5 раз нижчий гідравлічний опір, на 20-30% є ефективнішими, сприяють турбулізації потоків та збільшенню активної поверхні контакту фаз.

Основним недоліком циліндричних насадок (рис. 8,а) є нерівномірний розподіл потоку рідини у поперечному перерізі, у результаті чого частина рідини, розтікаючись по стінках колони, залишає апарат, ефективно не взаємодіючи із газом [4].



а – циліндричні; б – сідлоподібні; в – кулькові; г – гвинтові; д – S-подібні.

Рис. 8. Типи виконання масообмінних насадок

Внутрішня поверхня кільця Рашига менш доступна для газів, які перебувають у контакті із рідиною, ніж зовнішня поверхня. Це спонукало Е. Берля розробити ефективнішу насадку, що отримала назву сідла Берля (їх поверхня є гіперболічний параболоїд). При однакових розмірах насадкових тіл сідла Берля мають на 25% більшу питому поверхню

і дещо більший вільний об'єм, а також менший гідравлічний опір порівняно порівняно із кільцями Рашига. Ефективність їх вища за рахунок кращої змочуваності сідел рідиною.

Пізніше М. Лева розробив сідлоподібну насадку, яка усувала недоліки сидла Берля (утворення гнізд, у яких елементи насадки встановлюються один на одного). Насадка Лева, поверхня якої є частиною тора, найпоширеніша сьогодні керамічна насадка. Також розроблений ряд нових конструкцій сідлоподібних насадок (рис. 8, б). Для збільшення ефективності масообміну поряд з рівномірним розподілом потоку рідини необхідна також турбулізація (завихрення) газового потоку та усунення екранування насадковими елементами одне одного, що неможна досягти наявністю виступів на бічній поверхні сидельної або тороїдальної насадки [4].

За останнє десятиліття було розроблено багато конструкцій насадок, що успішно застосовуються у апаратах, які працюють у режимі псевдозрідження. Велика увага приділяється конструкціям кулькових насадок (рис. 8, в). Основними параметрами, які характеризують їх ефективність, є маса та форма. Кулі переміщуються у газорідинній зоні, перемішуючи потоки і збільшуючи цим поверхню контакту фаз. Була запропонована кульова насадка, що складається із двох півсфер, на поверхні яких рівномірно нанесена перфорація. Насадка порожня, півсфери жорстко з'єднані між собою. Ефективність конструкції зростає за рахунок збільшення питомої поверхні контакту фаз, а перфорація забезпечує видалення рідини, що потрапила всередину. Насадка використовується у апаратах, що працюють під тиском.

Гвинтові насадки (рис. 8, г) забезпечують високу ефективність масопередачі за рахунок інтенсивної турбулізації взаємодіючих потоків.

S-подібні насадки (рис. 8, д), мають просту конструкцію, забезпечують високу ефективність поділу. Для збільшення поверхні контакту й покращення її змочуваності відношення радіуса кривизни S-подібного елемента до діаметра описуваного ним кола рівне 0,5. Насадки виготовляють із пластмаси, кераміки, металевої смуги, дротяної сітки (суцільної, гофрованої, перфорованої).

В насадковій колоні 1 (рис. 7, а, б) насадка 3 встановлюється на опорні решітки 4, що мають отвори або щілини для проходження газу і стікання рідини, яка рівномірно зрошує насадку 3 з допомогою розподільвача 2 і стікає вниз по поверхні насадкових тіл у вигляді тонкої плівки. Проте рівномірне розподілення рідини по всій висоті насадки по перерізу колони зазвичай не досягається, що пояснюється крайовим (пристіночним) ефектом. Внаслідок цього рідина має тенденцію розтікатися від центральної частини колони до її стінок і практично повністю відтісняється від місця введення абсорбента до периферії колони на відстані, рівній чотирьом-п'яти її діаметрам. Тому часто насадку заван-

тажують в колону секціями висотою в чотири-п'ять діаметрів (але не більше 3...4 м. в кожній секції), а між секціями (шарами насадки) встановлюють перерозподільвачі 5 (рис. 7, б), які призначені для направлення рідини від периферії колони до її осі.

Насадкові абсорбери повинні працювати з максимально можливими швидкостями газового потоку, при яких насадка не захлинається [4]. Звичайно ця швидкість перевищує половину швидкості захлинання.

Найкращим апаратом слід вважати такий, для якого техніко-економічні показники будуть найбільш високими, тобто вартість переробки 1 м<sup>3</sup> газу або витрати на 1 т продукції будуть найменшими.

У багатьох випадках прагнуть застосовувати високо інтенсивні абсорбери, що мають невеликі габарити. Однак вартість таких апаратів може бути висока. Окрім того, вони часто витрачають велику кількість енергії та є ненадійними в експлуатації. В результаті матеріальні витрати можуть зрости. Тому доцільність інтенсифікації повинна бути попередньо розрахована.

Для оцінки ефективності абсорберів звичайно використовують різні співвідношення, що включають характеристику інтенсивності процесу й гідравлічного опору. Доцільний тип апарата для кожного конкретного випадку можна вибрати тільки в результаті техніко-економічних розрахунків, проведених для декількох конкуруючих типів.

Розглядаючи придатність різних типів абсорберів до конкретних технологічних процесів можна виокремити кілька типів. Вибрані типи для конкретних умов потрібно порівняти один з одним відносно простоти виготовлення, витрати металу й інших матеріалів, вартості, зручності в експлуатації тощо. У ряді випадків необхідно враховувати виченість відповідного типу апарата й наявність необхідних даних для його розрахунків.

### **Висновки**

В даний час існують різноманітні способи уловлювання, очищення та зменшення забруднень, що продукуються під час виготовлення цементу. Зниження таких викидів можливе за використання сучасних фільтрів, первинних технічних рішень інтегрованих у технологічний виробничий ланцюг, оптимізації певних процесів, підбору сировинних матеріалів, використання новітнього обладнання. Поширеним способом очищення димових газів під час виробництва цементу є використання методу абсорбції. Для абсорбції газових забруднювачів найчастіше застосовують тарілчасті і насадкові колони. На основі проведеного критичного аналізу таких конструкцій та їх елементів наведено особливості їх роботи, конструктивні особливості, переваги та недоліки.

В подальших дослідженнях потрібно вибирати такий апарат, для якого техніко-економічні показники будуть найвищими. Для оцінки ефективності абсорберів зазвичай використовують різні співвідношен-

ня, що включають характеристику інтенсивності процесу та гідравлічного опору. Розглядаючи придатність різних типів абсорберів до конкретних технологічних процесів необхідно виокремити кілька типів. Вибрані типи для конкретних умов потрібно порівняти один з одним відносно простоти виготовлення, витрати металу й інших матеріалів, вартості, зручності в експлуатації тощо. Надалі слід вдосконалювати такі пристрої з метою оптимізації процесу очищення димових газів та підвищення показників абсорбції.

### *Література*

1. Лук'янихін В.О., Зубко К.Ю. Еколого-економічний вплив на довкілля використання природних і штучних матеріалів у будівництві. Економіка будівництва і міського господарства. – Київ: Наука, 2011. – 172 с.
2. Довідник працівника газотранспортного підприємства /за заг. Редакцією А.А. Рудніка/ – Київ: «Росток», 2001. – 1091 с.
3. Концур І.Ф., Лях М.М., Михайлюк В.В., Дейнега Р.О., Лещенко М.А. Аналіз існуючих абсорберів та особливості їх роботи. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. (Дніпро, 17 – 19 березня 2020 р.) / Міністерство освіти і науки України, Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. – Дніпро: НМетАУ, 2020, С. 345-349. с.
4. Концур І.Ф., Лях М.М., Михайлюк В.В., Дейнега Р.О., Лашко С.О. Аналіз промислових масообмінних насадок та показників їх ефективності. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. (Дніпро, 17 – 19 березня 2020 р.) / Міністерство освіти і науки України, Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. – Дніпро: НМетАУ, 2020, С. 341-344. с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 14.11.2023 р.*

## **ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE FEATURES OF ABSORBERS**

**M. M. Lyakh, V. V. Mykhaylyuk, V. R. Protsyuk, R. O. Deineha,  
A. V. Petrynka, O. YA. Fafley**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, str. Karpatska, 15;  
tel. 0978984786, e-mail: myhajlyukv@ukr.net*

*The production of cement mixtures is accompanied by significant emissions of harmful substances: the formation of nitrogen oxides, dust emissions from furnaces, clinker coolers and mills for grinding raw materials, water vapor, sulfur dioxide, oxide and carbon dioxide, etc. These emissions cause significant damage to the environment. Despite modern technologies and equipment used to eliminate the negative impact of cement production on the environment, it is impossible to completely eliminate it. Therefore, the capture, storage and further use of harmful elements as raw materials in the flue gases of cement enterprises is an important task today. The paper analyzes the main sources of harmful emissions during cement production and existing ways of reducing them. Emphasis is placed on the application of the absorption method and the mechanisms of its use. A critical analysis of the existing types of plate and nozzle absorbers was carried out, the designs of industrial mass exchange nozzles were analyzed, which ensure the intensification of the mass exchange process, the reduction of hydraulic resistance, the reduction of energy consumption, etc. When designing for the further operation of absorbers, it is important to evaluate their efficiency, which includes the characteristics of process intensity and hydraulic resistance. The selection of an absorber for each specific task should be carried out as a result of technical and economic calculations carried out for several competing types. At the same time, it is necessary to take into account the ease of manufacture, consumption of metal and other materials, cost, ease of use, etc.*

**Key words:** *cement production, flue gases, harmful emissions, water vapor, dust, absorption.*