

## ОСОБЛИВОСТІ ПІДБОРУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ

Л.В. Лось  
д.т.н., професор  
О.Д. Муляр  
к.с.-г.н., доцент  
А.А. Голубенко  
асистент  
Н.М. Цивенкова  
асистент

*Наведено порівняльні характеристики обладнання для очищення газів з точки зору можливості та раціональності їх використання в газогенераторних установках, проаналізовано основні умови очищення генераторних газів, специфічні особливості забруднення. Виділено основні групи обладнання для очищення, порівняні за працездатністю в умовах підвищених температур та за продуктивністю, якістю очищення, енергомісткістю та втратами тиску, визначено критерії підбору очисного обладнання, як важливого елементу газогенераторної установки.*

### **Постановка проблеми**

Практика газифікації твердих палив, особливо органічного походження, показує, що склад генераторного газу значною мірою залежить від конструкції самого газогенератора та правильності вибору режимів газифікації, але, незалежно від цього, містить значну кількість зольного пилу, вологи та смолистих компонентів, що є актуальним для випадків газифікації рослинної біомаси.

### **Аналіз основних досліджень та постановка завдання**

Огляд літературних джерел дозволив оцінити високий рівень технічних надбань в галузі апаратів для очищення промислових викидів, повітря промислових установок або виробничих приміщень тощо. Очищення генераторного газу є специфічним через умови роботи газоочисного обладнання та особливості забруднюючих речовин; досліджувалося переважно для окремих конкретних випадків в ряді дисертаційних досліджень український та зарубіжних вчених. Більш широко застосування різних способів очищення генераторних газів та апаратів для їх реалізації розглянуто в [3], де наведено первинну класифікацію способів газочищення.

В результаті проведеного огляду основних досліджень було сформульовано завдання дослідження: проаналізувати та систематизувати існуюче різноманіття апаратів для очищення газів за можливістю та раціональністю його застосування в газогенераторних установках, визначити критерії їх вибору для різних схем установок, запропонувати найкращий варіант для проведення подальших лабораторних досліджень.

### **Об'єкт та методика досліджень**

Об'єктом дослідження є процес очищення генераторного газу, його особливості, параметри, які визначають вибір технологічного обладнання (склад забруднень, температурні умови, вологість газу, втрати тиску на апаратах газоочищення). Для проведення дослідження використано комплекс методів наукового дослідження: порівняльний, теоретичний та статистичний, системний метод аналізу і синтезу, формальна та аналітична оптимізація варіантів схем очищення.

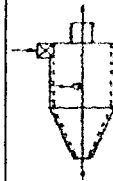
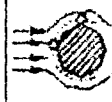
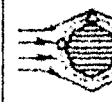
### **Результати досліджень**

В промисловості використовують механічний, електричний та фізико-хімічний способи очищення газів. Для очищення від твердих та рідких зважених часток використовують способи очищення під дією сили ваги, відцентрових та електростатичних сил, а також промиванням та фільтруванням. Реалізація способів очищення пов'язана з використанням відповідних апаратів: газових відстійників, відцентрових пилоосаджувачів, електричних

фільтрів, гідравлічних пиловловлювачів та газових фільтрів. Вибір апарату для очищення генераторного газу визначається рядом факторів, головним з яких є розмір частинок, що вловлюються, задана ступінь очищення газу та енергетичні показники такого процесу. Виходячи з параметрів часток, що вловлюються, найчастіше і здійснюють вибір газоочищувача, що є суттєвим недоліком, бо не враховані інші фактори, в тому числі і вміст смол, і висока температура газу, що очищується (табл. 1).

Таблиця 1

## Основні характеристики газоочисного обладнання

| Спосіб очищення                                | Механічна сепарація                                                               |                                                                                   |                                                                                   | Електростатична фільтрація                                                        |                                                                                     | Зволоження                                                                          | Мембранна фільтрація                                                                |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Апарат                                         | пилоосаджувальні камери                                                           | інерційні камери                                                                  | відцентропилоосаджувачі (циклони)                                                 | електрофільтри                                                                    | комбіновані електричні очищувачі                                                    | гідравлічні пиловловлювачі, механічні газопромивачі                                 | газові фільтри                                                                      |
| Схематичне зображення                          |  |  |  |  |    |  |  |
| Сила, що діє                                   | Гравітаційна сила                                                                 | Сила інерції                                                                      | Відцентрова сила                                                                  | Сила дії електростатичного поля                                                   | Інерційні зіткнення, механічне затримання, дифузія, сила дії електростатичного поля | Інерційні зіткнення                                                                 | Механічне затримання, дифузія                                                       |
| Сепаруючий фактор                              | Бар'єрне поле                                                                     | Конструктивний елемент, що розвертає потік                                        | Стінка апарату                                                                    | Осаджуєчий електрод                                                               | Фільтруючий прошарок                                                                | Поверхня водяної краплі                                                             | Фільтруюча мембрана                                                                 |
| Спосіб виведення відфільтрованих часток        | Бар'єрна зона                                                                     | Гравітаційною та відцентровою силами                                              | Гравітаційна сила газового потоку                                                 | Вібрацією та вручну                                                               | Зворотне імпульсне продування та вібрація                                           | Усунення методом зливання з водою                                                   | Зворотне імпульсне продування та вібрація, хімічна регенерація                      |
| Швидкість газу, м/с**                          | 1,5–2                                                                             | 15–20                                                                             | 20–30                                                                             | 0,8–1,5                                                                           | 0,01–0,3                                                                            | 0,5–100                                                                             | 0,01–0,3                                                                            |
| Втрата тиску                                   | Дуже незначна                                                                     | Середня                                                                           | Велика                                                                            | Дуже незначна                                                                     | Середня                                                                             | Середня, велика                                                                     | Велика                                                                              |
| Граничний розмір відфільтрованих часток, мкм** | 5–20000                                                                           |                                                                                   | 3–100                                                                             | 0,005–10                                                                          | 0,005–10                                                                            | 0,01–10                                                                             | 2–10                                                                                |
| Ступінь очищення*, %                           | 40–70                                                                             |                                                                                   | 45–85                                                                             | 85–99                                                                             | 85–99                                                                               | 85–99                                                                               | 85–99                                                                               |
| Температура                                    | Не має обмежень, залежить від матеріалу стінок                                    |                                                                                   |                                                                                   | Чутливий до високих температур                                                    | Залежить від фільтруючого прошарку                                                  | Нормальна температура                                                               | Високочутливий до перепаду температур                                               |

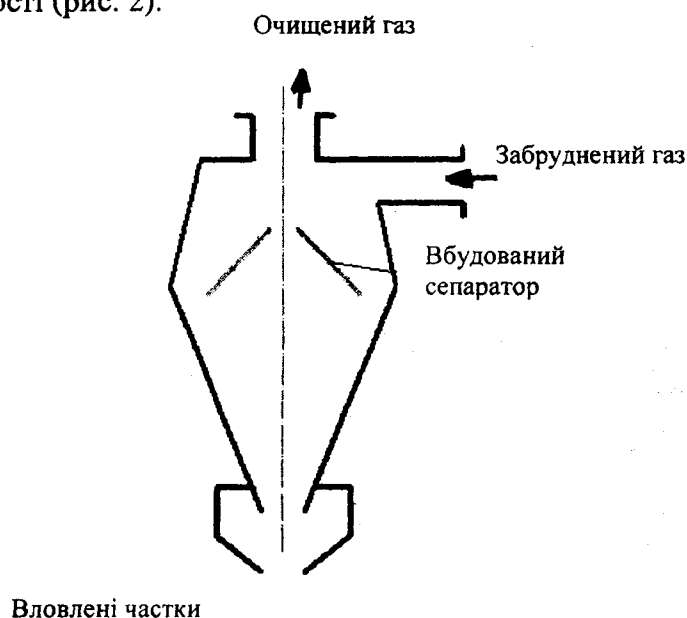
**Примітка\*:** Ступінь очищення в більшості апаратів залежить від розміру часток – чим менша частка, тим менша ефективність очищення, тому за ступенем очищення можна оцінити приблизний розмір залишкових часток;\*\* – за [1, 2, 4]

Наведені дані дають уявлення виключно про порядок відповідних величин і значною мірою залежать від стану, властивостей і складу генераторного газу. Як можна побачити з таблиці 1, пилоосаджувальні камери можна використовувати виключно для порівняно грубого очищення газу, що відповідає попередньому очищенню і може бути використано в системах, які передбачають багаторівневі очисні системи, це, перш за все, відповідає стаціонарним газогенераторним установкам. Крім всього іншого, пилоосаджувальні камери мають значні габаритні розміри, що також обмежує їх застосування. Саме тому на практиці надають

перевагу циклонам через більш високий ступінь очищення, але втрати тиску в такому апараті визначають необхідність додаткового обладнання, і, відповідно, такий спосіб є більш енергомістким.

Перевагами циклонів є простота їх конструкції та можливість очищення газу високої температури (до 400°C). При невисокій кількості зважених часток в газі можна використовувати батарейні циклони, але при цьому погіршується теплообмін з оточуючим середовищем і температура очищеного газу не набагато нижча за температуру вхідного газу. Циклони мають також ряд суттєвих недоліків при використанні для очищення генераторного газу: має місце значне абразивне зношення поверхонь, налипання на поверхні смолистих матеріалів, яке призводить до нашаровування пилу і погіршують гідравлічні властивості, підвищується енергомісткість. Одним з найбільш значних недоліків є висока чутливість до стабільності потоку.

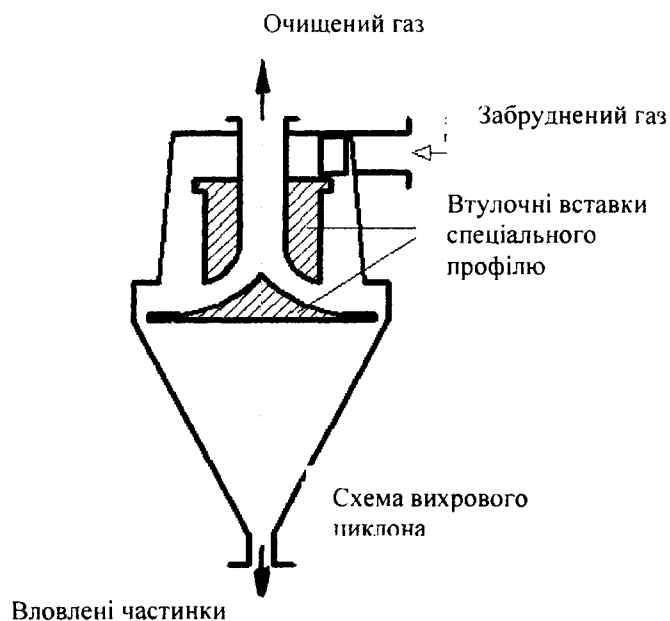
Домогтися виконання цієї умови в газогенераторних установках можливо тільки шляхом значного ускладнення конструкції самої установки або використанням нестандартних конструкцій циклонів, таких як циклон із вбудованим сепаратором (рис. 1) або циклон підвищеної ефективності (рис. 2).



**Рис. 1. Циклон із вбудованим сепаратором для компенсації нерівномірності газового потоку**

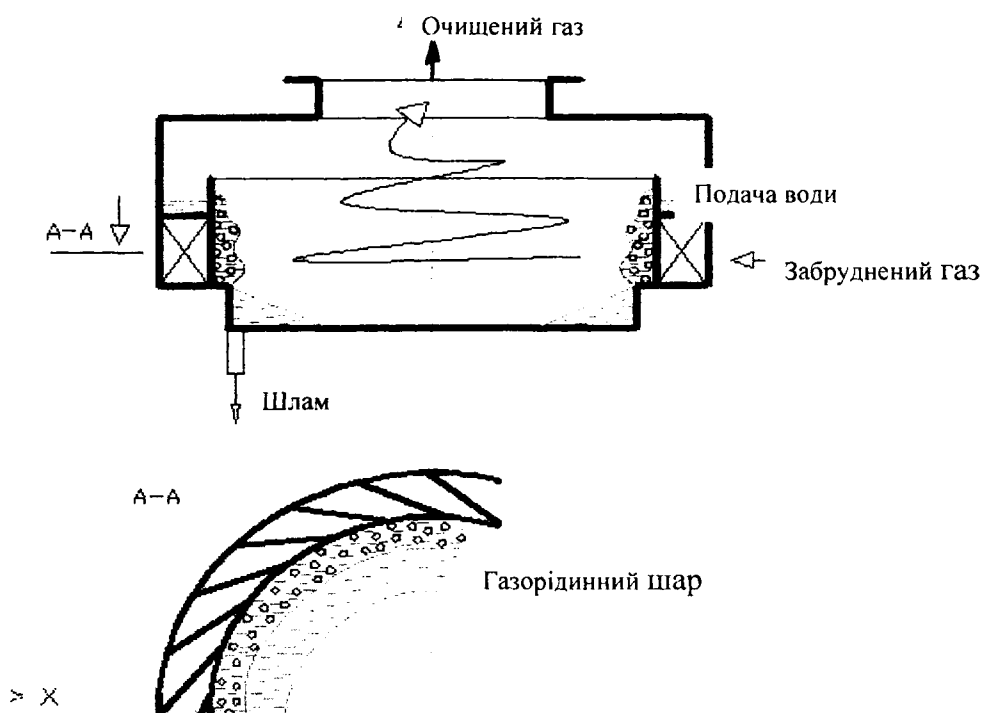
Більш високі ступені очищення генераторного газу можуть бути досягнуті використанням гідравлічних пиловловлювачів, електро- та мембранних фільтрів.

Вологе очищення (миття газу) є ефективним для очищення генераторного газу саме через обмеження його використання в промисловості: вологе очищення супроводжується охолодженням, частковим окисленням газу, вловлювальні частинки погано відокремлюються від рідини і виводяться з апарату виключно в рідкому стані. Легке очищення апарату від частинок, що відфільтровуються, охолодження газу та часткове окислення летючих компонентів є позитивними характеристиками, крім того, такі апарати мають високу продуктивність і забезпечують високу якість очищення від смолистих компонентів, які при швидкому охолодженні скраплюються та виводяться разом з твердими частинками.



**Рис. 2. Циклон підвищеної ефективності з системою втулок спеціального профілю**

Основними недоліками такого способу є зволоження газу і підвищена енергомісткість процесу. Апарати високої ефективності очищення, такі як вихровий скруббер (рис. 3), розширюють можливості використання цієї групи газоочисників.



**Рис. 3. Схема вихрового скруббера**

Електрофільтри через чутливість до високих температур можуть бути використані в обмеженій кількості схем газогенераторних установок, де вони розташовуються після охолоджувачів та апаратів попереднього очищення. При високому ступені очищення такі

апарати достатньо енергомісткі та затратні, тому на практиці частіше використовуються комбіновані варіанти, такі як вологі електрофільтри.

Мембранні фільтри дозволяють забезпечити добре очищення газу, але через високу вартість та чутливість до температур їх використання в газогенераторних установках на даному етапі технічного розвитку ускладнене.

Основні розрахункові елементи газоочисного обладнання для газогенераторних установок [1, 2] наведені в таблиці 2. відцентровані пило осаджувані (циклони)

Таблиця 2

### Основні розрахункові елементи газоочисного обладнання

| Розрахунковий елемент                      | Спосіб очищення                      |                                           |                                                              |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                                            | механічна сепарація                  |                                           | зволоження                                                   |
|                                            | пилоосаджувальні камери та інерційні | відцентровані пилоосаджувані (циклони)    | гідрравлічні пиловловлювачі, механічні газопромивачі         |
| Теоретична швидкість осаджування $W$ , м/с | $Re \cdot v^2 / d$                   | $d^2 \cdot (r_1 - r_2) w_r^2 / 9 v r_2 D$ | $Re \cdot v^2 / d$                                           |
| Висота робочої зони $H$ , м                | $n \cdot (h + h_1)$                  | $2V / (D - D_1) w_r$                      | Обирається конструктивно                                     |
| Час перебування газу в камері $t$ , с      | $L / w$                              | $L / w$                                   | $V_{ст} \cdot (t_r + 273) / (360 \cdot 293 \cdot p \cdot V)$ |

У таблиці 2:  $Re$  – критерій Рейнольдса;  $v^2$  – кінематична в'язкість газу;  $d$  – діаметр частинки;  $h$  – відстань між полицями;  $h_1$  – товщина однієї полиці;  $n$  – кількість полиць;  $L$  – довжина камери;  $w$  – швидкість осадження;  $r_1$  – щільність часток, які вловлюються;  $r_2$  – щільність газового середовища;  $w_r$  – колова швидкість газу в циклоні;  $D$  – діаметр циклона;  $V_{сек}$  – об'єм газу, що надходить в циклон за секунду;  $D_1$  – зовнішній діаметр вихлопної труби циклона;  $V_{ст}$  – об'єм газу за нормальних умов;  $t_r$  – температура, °C;  $p$  – тиск, МПа.

Через особливості складу та умов експлуатації газогенераторних установок виникає необхідність багатоступінчастого очищення газу. Як правило, первинне очищення в таких випадках проводять у сухих пиловловлювачах, в яких осідають частинки пилу розміром 50 мкм і більше. У цих апаратах вловлюється 70–90 % пилу, що міститься в газі, завдяки впливу сил гравітації й інерційних сил, що виникають при повороті газового потоку на 180°. Такі пиловловлювачі ефективно суміщати із системою охолодження. Залишковий вміст пилу в газі після грубого очищення не перевищує 3–20 г/м³.

Для другого ступеня очищення газу раціонально використовувати системи вологого очищення. Зазвичай газ із системи грубого сухого очищення надходить на напівтонке очищення газу, де видаляються частинки розміром 20 мкм і більше та газ очищується до залишкового вмісту пилу на виході 0,6–1,6 г/м³. Напівтонке очищення здійснюють в апаратах вологого типу – форсункових порожнистих скруберах і трубах Вентурі. Газу в скруберах мають швидкість 1–2 м/с, питома витрата води, становить 3–6 кг/м³ газу. Проходячи через скрубер, газ додатково охолоджується з 250–300 °C до 40–50 °C і насичується вологою. Ступінь очищення газу від пилу в скрубери не перевищує 60–70 %. Після скрубера газ надходить у дві-чотири низьконапірні труби Вентурі, швидкість газів у горловині яких дорівнює 50–80 м/с при питомій витраті води 0,2 кг/м³. На даному етапі завершується напівтонке очищення газу.

При виникненні необхідності тонкого очищення газу, що містить концентрацію пилу до 10 мг/м³, доцільно використовувати апарати, які працюють з малою втратою тиску, наприклад, вологий електрофільтр.

Таким чином, зазвичай застосовують такі схеми очищення генераторного газу:

1) газогенератор → сухий пиловловлювач → скрубер → труба Вентурі → краплевловлювач → дросельна група → краплевловлювач → чистий газ;

2) газогенератор → сухий пиловловлювач → скруббер → труба Вентурі → краплевловлювач → вологий електрофільтр → чистий газ.

3) газогенератор → циклон → скруббер → конденсатор вологи → крапле вловлювач → фільтр з шаром фільтрувального матеріалу → чистий газ.

4) газогенератор → циклон → фільтр з шаром фільтрувального матеріалу (або рукавний фільтр) → чистий газ.

Із зазначених вище варіантів найбільш енергоекономним, компактним та недорогим є останній, в якому реалізовано схему сухого очищення генераторного газу.

Експлуатаційні витрати на очисні апарати залежать, в основному, від вартості електроенергії, водопостачання та обслуговування. З точки зору експлуатаційних витрат, важливо врахувати можливість регенерації фільтрувальних елементів фільтрів сухого очищення. Ефективність знепилювання газів в фільтрі залежить від дисперсності частинок пилу, характеристик фільтрувального полотна, способу і режиму регенерації, величини питомого газового та пилового навантаження, гідравлічного опору апарату.

При виборі фільтра також важливим елементом є безпека його експлуатації та обслуговування з врахуванням вибухонебезпечності генераторного газу. Використання скрубберів та вологих електрофільтрів забезпечує безпеку роботи при очищенні вибухонебезпечних газів, але їх використання може бути ускладненим і одночасно збільшує експлуатаційні витрати майже вдвічі. З погляду раціонального природокористування, більш прогресивними є способи сухого очищення газу, тому що їх використання знижує загальне забруднення водних та земельних ресурсів і дозволяє виключити із системи оборотного водопостачання умовно брудну воду.

#### **Висновки та перспективи подальших досліджень**

Результати дослідження дозволяють порівняти способи та апарати для очищення генераторного газу, виконати компоновку схеми газогенераторної установки згідно з вимогами споживача до вихідного газу, підтвердили високу економічну та екологічну ефективність використання переважно сухого способу очищення генераторних газів, не зважаючи на високу ефективність та ряд суттєвих переваг вологого очищення та газового миття. Якісне очищення дозволить забезпечити стабільну і ефективну роботу газогенераторної установки, підвищить ресурс роботи обладнання, що споживає генераторний газ для вироблення теплової або електричної енергії, поліпшить екологічну обстановку. Результати дослідження будуть використані у подальших розробках факультету механізації і електрифікації сільського господарства ЖНАЕУ в напрямку подальших конструкторських розробок систем очищення генераторного газу.

#### **Література**

1. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве / С.Б. Старк. – М. : Металлург, 1990. – 400 с.
2. Юдашкин М.Я. Очистка газов в металлургии / М.Я. Юдашкин. – М. : Металлург, 1976. – 384 с.
3. Lin Wei-ji. Biomass gasification principles and applications / Lin Wei-ji, Zhang Da-lei, Ren Yong-zhi // Biomass Gasification training course. Liaoning institute of energy resources. – 2002. – С. 56–66.
4. Газоочистка по-новому – нестандартные циклоны и скрубберы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.edvensgroup.ru/articles/nestandartnye-tsiklony>.