

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра механіки та  
інженерії агроecosистем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Романюк Максим В'ячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

УДК 620.97

(індекс)

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

### **Обґрунтування параметрів обладнання для очищення і охолодження генераторного газу з біомаси**

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ М. В. Романюк

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Цивенкова Н.М.

(прізвище, ім'я, по батькові)

ДОЦЕНТ, КАНД. ТЕХ. НАУК

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2020

## АНОТАЦІЯ

Романюк М. В. Обґрунтування параметрів обладнання для очищення і охолодження генераторного газу з біомаси. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Проаналізовано технологічні процеси та обладнання для очищення та охолодження генераторного газу від механічних домішок і смол. Представлено конструкцію двоступінчатої системи очищення газу. Розроблено методику, яка дозволяє визначити вміст пилу в генераторному газі по мірі проходження його через наповнювачі з різною висотою, поверхнею та площею поперечного перерізу. Експериментально досліджено вплив висоти шару зрошувальної насадки, її типу, швидкості газу в очищувачі, витрати води та щільності зрошування на ступінь очищення та охолодження генераторного газу. Отримано високу ступінь відповідності теоретичних даних експериментальним.

**Ключові слова:** генераторний газ, газогенератор, фільтрація, система очищення газу.

## SUMMARY

Romanyuk M.V. Substantiation of parameters of equipment for generator gas from biomass purification and cooling. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

Technological processes and equipment for purification and cooling of generator gas from mechanical impurities and tars are analyzed. The design of a two-stage gas purification system is presented. A technique has been developed to determine the dust content in the generator gas as it passes through the fillers with different heights, surfaces and cross-sectional areas. The influence of the irrigation nozzle layer height, its type, gas velocity in the purifier, water consumption and irrigation density on the degree of generator gas purification and cooling was investigated experimentally. A high degree of conformity of theoretical data to experimental ones was obtained.

Key words: generator gas, gas generator, filtration, gas purification system.

## ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
	ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1.	АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ І ОХОЛОДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ З БІОМАСИ.....	7
1.1.	Аналіз технологічних процесів очищення і охолодження генераторного газу з біомаси.....	7
1.2.	Аналіз конструкцій апаратів очищення і охолодження генераторного газу з біомаси.....	9
1.3.	Висновки до розділу 1.....	10
РОЗДІЛ 2.	ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ ВІД МЕХАНІЧНИХ ДОМІШОК І СМОЛ.....	11
2.1.	Математичне моделювання параметрів процесу і обладнання для очищення генераторного газу від механічних домішок і смол.....	11
2.2.	Висновки до розділу 2.....	18
РОЗДІЛ 3	МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
3.1.	Обладнання та методика проведення експериментальних досліджень.....	19
3.2.	Результати дослідження параметрів обладнання для очищення і охолодження генераторного газу з біомаси.....	22
3.3.	Висновки до розділу 3.....	28
	ВИСНОВКИ.....	29
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30
	ДОДАТКИ.....	34

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$m \cdot \omega^2 / r$  – відцентрова сила інерції;

$f \cdot F \cdot \rho_0 \cdot u^2 / 2$  – сила опору;

$m$  – маса частинок пилу;

$r$  – радіус по якому рухаються часточки пилу в даний момент;

$f$  – коефіцієнт опору частинок пилу;

$F$  – поперечний переріз частинок пилу;

$\rho_0$  – щільність повітря;

$u$  – нормальна складова швидкості руху частинок;

$\omega$  – тангенціальна складова швидкості руху частинок;

$\rho$  – масова щільність частинок пилу;

$\delta$  – діаметр частинок;

$\theta$  – кут повороту;

$\tau$  – час;

$\nu$  – кінематична в'язкість газу;

$Re$  – число Рейнольдса;

$\eta$  – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність процесу очищення газу від частинок пилу;

$y$  – кількість пилу в газі або воді;

$x$  – шлях, пройдений газом в наповнювачі фільтра.

$f \cdot \nu \cdot y_0$  – кількість пилу, що надходить в канал за одиницю часу;

$\beta \cdot f_s \cdot \nu \cdot y_0$  – кількість пилу, що досягла стінок каналу та осіла на них (будемо вважати, що стінки каналу змазані липкою речовиною);

$\beta$  – коефіцієнт ефективності удару частинок пилу об поверхню речовини;

$f_s$  – поверхневий переріз частини струменя, із якої виділились частинки пилу;

$f \cdot \nu \cdot y$  – кількість пилу на виході із каналу.

$G$  – вага волокон;

$\gamma_H$  – питома вага волокон;

$f_H$  – поперечний переріз волокон.

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Важливість питання очищення генераторного газу стимулює розвиток досліджень в цій галузі вже більше двох десятиліть, але дотепер ефективна та надійна технологія, особливо для очищення газу з температурою понад 600 °С, не розроблена [1, 4, 9].

Останні роки активно ведуться дослідження та здійснюються розробки в напрямку підвищення ступеню фільтрації твердих механічних домішок та смол. Однак, хоча ці технології значно вдосконалилися, проте досягти цілковитої надійності цих систем під час експлуатації в реальному системному середовищі на основі інтегрованої газифікації, особливо для установок продуктивністю до 100 м<sup>3</sup>/год не вдалося. Це пояснюється тим, що процес очищення генераторного газу є досить складним через специфічний фізико-хімічний склад забруднюючих речовин та умови роботи очисного обладнання та установок.

Високою ефективністю відрізняються двоступеневі системи очищення з одночасним охолодженням газу, які включають суху та мокру стадії очищення газу, але наукові розробки в напрямку розвитку даної технології ведуться лише для газогенераторних установок з продуктивністю понад 100 м<sup>3</sup>/год [8, 9].

Отже, слід провести дослідження з обґрунтування параметрів процесу та обладнання для очищення і охолодження генераторного газу з біомаси, яким оснащуються газогенераторні установки продуктивністю до 100 м<sup>3</sup>/год.

**Метою роботи** є підвищення ефективності процесу очищення і охолодження силового генераторного газу з біомаси в фільтраційних установках, якими оснащують газогенератори продуктивністю до 100 м<sup>3</sup>/год.

### **Завдання роботи:**

- виконати аналіз теоретичних положень та результатів експериментальних досліджень процесу очищення і охолодження генераторного газу від механічних домішок і смол;
- математично обґрунтувати параметри процесу та обладнання для здійснення очищення і охолодження генераторного газу;

– експериментально дослідити вплив витрат води на очищення газу, типу зрошуваної насадки, швидкості газу в скрубєрі та площі поперечного перерізу скрубєра на ступінь очищення генераторного газу.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи обладнання з очищення та охолодження генераторного газу на ступінь очищення генераторного газу від механічних домішок і смол.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес очищення і охолодження генераторного газу з біомаси.

**Методи дослідження.** Аналітичні дослідження здійснювалися із застосуванням основних положень математичної статистики, теорії ймовірності, математичного моделювання та програмування. Експериментальні дослідження проводились з використанням експериментальної установки Поліського національного університету згідно з галузевими стандартами і у відповідності до прийнятої методики із застосуванням відповідного вимірювального обладнання.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження:**

Результати кваліфікаційної роботи надруковано в збірниках праць «Студентські читання – 2020: Матеріали науково-практичних конференцій «Студентські читання – 2020». Житомир: Поліський національний університет, 2020, які проходили 5-6 березня та 26 жовтня 2020 року.

**Практичне значення отриманих результатів:**

– розроблено дослідний зразок фільтраційного обладнання, що складається з сухої та мокрої ступенів очищення і може слугувати прототипом до промислового зразка обладнання для очищення генераторного газу;

– обґрунтовано параметри фільтраційного обладнання, при яких досягається найвища якість очищення генераторного газу.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота містить вступ, три розділи, кожен з яких включає підрозділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних літературних джерел з 35 найменувань, додатки. Загальний обсяг роботи становить 29 арк.

# РОЗДІЛ. 1

## АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ І ОХОЛОДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ З БІОМАСИ

### 1.1. Аналіз технологічних процесів очищення і охолодження генераторного газу з біомаси

Зростання цін на викопні види палива сприяє інтенсивному розвитку технологій альтернативної енергетики, однією з яких є газифікація [9–12]. Однак, для надійної роботи теплотехнічного обладнання на генераторному газі слід забезпечити його належне охолодження і очищення [9–12].

Аналіз наукових робіт по методам очищення і охолодження газів [13] свідчить про існування безлічі конструкцій масообмінних апаратів і обладнання для уловлювання пилу, а також схем їх підключення. Причому, одні пристрої мають високу енергоємність – рукавні фільтри, насадні апарати; інші – є складними за конструктивним оформленням і в експлуатації – колонне обладнання, електрофільтри; треті – мають низьку ефективність, наприклад пінні і механічні апарати. В промислових масштабах найбільш широко використовуються схеми послідовного та паралельного підключення газоочисних систем [14, 20]. Послідовне підключення виключає наявність проміжних потоків, що підвищує сумарну ефективність системи. Однак, вони є багатостадійними через низьку ефективність окремих ланцюгів системи, що пояснюється наявністю, особливо в генераторних газах, механічних домішок, які виводять з ладу абсорбційні апарати [32]. Паралельне з'єднання апаратів використовують при низькій продуктивності одиночних апаратів і необхідності очищення газів великих обсягів [26]. Однак, через високу вартість і конструктивну складність, дані схеми з'єднання мало використовуються для очищення газів невеликих об'ємів до 200 м<sup>3</sup>/год, що є характерним для виробничих умов невеликих аграрних і фермерських господарств.

Згідно [23] для генераторних газів рекомендується використовувати технології і апарати мокрого очищення. Вони дозволяють очищати генераторні гази без попередньої підготовки. У таких апаратах одночасно протікають

процеси абсорбції і очищення газів від домішок абразивного характеру. Недоліком такої технології є те, що конструкції очищувачів мокрого типу при очищенні генераторних газів з домішками абразивного характеру, часто виходять з ладу через налипання мокрих твердих частинок і засмічення смолами. Ефективність очищення газу також зменшується і через наявність в ньому дисперсних частинок, що мають низьку ступінь змочування [5, 7].

Перспективним напрямком інтенсифікації процесу мокрого очищення газу є використання обладнання, що працює в режимі розвиненої турбулентності [19]. Продуктивність апарату і підвищення ефективності очищення газу збільшується за рахунок зростання швидкості газу, що також сприяє зниженню матеріаломісткості конструкції. В зазначеному режимі працюють апарати з рухомими насадками, вихрові апарати, апарати з провальними тарілками великих отворів тощо [16]. Однак, таке обладнання є дорогим при використанні в газогенераторних установках з газогенераторами низької продуктивності (до  $100 \text{ м}^3/\text{год}$ ), що невиправдано підвищує вартість конструкції всієї установки. До того ж, генераторний газ є складним для очищення через фізико-хімічні властивості забруднюючих речовин і смол, дисперсний склад механічних домішок і їх концентрацію [4, 12]. Газоочисне обладнання, призначене для природного газу, для очищення генераторних газів не підходить, оскільки не забезпечує потрібний ступінь очищення.

Роботи, присвячені теорії і розрахункам процесів, що протікають в скруберах, при очищенні генераторних газів, вироблених з біомаси, в більшій мірі вирішують питання охолодження газу ніж його очищення [8, 27]. Експлуатаційні дані і рекомендовані параметри по очищенню силового генераторного газу для стаціонарних газогенераторних установок, обладнаних скруберами, досить суперечливі [7, 8, 9]. Для установок продуктивністю до  $100 \text{ м}^3/\text{год}$  дослідження практично не проводилися.

Отже, можна зробити висновок про доцільність проведення досліджень щодо ефективності використання складних дворівневих систем очищення і охолодження генераторного газу в установках, якими обладнані газогенераторні установки продуктивністю до  $100 \text{ м}^3/\text{год}$ .



## 1.2. Аналіз конструкцій апаратів очищення і охолодження генераторного газу з біомаси

Для очищення газового потоку від механічних домішок розміром понад 5 мкм найбільш широко використовують циклони [31]. Залежно від дисперсного складу механічних домішок, їх якісних характеристик та вимог щодо ступеня очищення газу в якості апаратів першого ступеня очищення застосовують циклони, або в якості одиночних апаратів, або в поєднанні з іншими пиловловлювачами (рис. 1.1 та рис. 1.2) [16].

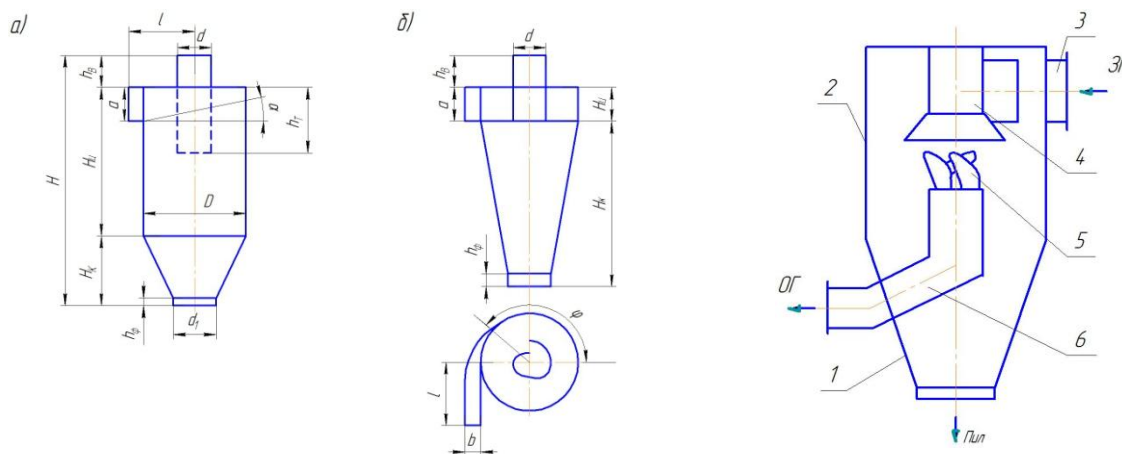


Рис. 1.1. Конструктивна схема циклону циліндричного типу (а) та конічного типу (б) [16]

Рис. 1.2. Прямопотоковий циклон типу «ЦКТИ»: 1 – конус; 2 – циліндрична частина; 3 – штуцер; 4 – вставка, для обертання газу; 5 – патрубок розкручування очищеного газу; 6 – патрубок відведення очищеного газу [16]

Перевагою циклонів є надійність та ефективність функціонування при температурах газу понад 600 °С, наявність лише жорстко закріплених частин в апараті, простота конструкції, здатність вловлювання абразивних частинок, які мають специфічне покриття зовнішньої поверхні, незалежність функціонування апарату від тиску газу, низька вартість та висока продуктивність. Основним недоліком є те, що експлуатація циклонів при значеннях гідравлічного тиску понад 1,2...1,5 МПа призводить до незадовільного очищення газу від абразивних механічних домішок розміром менше 5 мкм [15, 16].

Однак, зважаючи на специфічний склад забруднюючих компонентів генераторного газу циклони використовують лише як першу ступінь для

грубого очищення газу від великих за розмірами механічних домішок, що стосується питання очищення від смол, то ці апарати малоефективні. Для цього використовують мокрі пиловловлювачі. Пиловловлювачі мокрого типу за принципом дії поділяють на групи [21, 22]: плівкового типу, де вода у вигляді водяних плівок стікає зі стін (осаджений пил рухається в напрямку руху води); зрошувального типу, де рідина, яка подається з зрошуваних насадок, стікаючи, утворює водяну завісу, через яку пропускають потік газу; комбіновані, які поєднують вище зазначені способи очищення; мокрі фільтри, де середовищем, через який пропускають газ, є піна або вода.

Перша група включає: пиловловлювач плівкового типу з вертикальними насадками, зрошуваний циклон та циклон з водяною плівкою «ЛЮТ» [21, 22].

Друга група включає: пиловловлювачі шахтного, багатозонного та горизонтального типів; насадковий скруббер; турбінний пиловловлювач відцентрового типу; механічний апарат для промивання газу; башту з ґратами для пиловловлювання; камеру мокрого очищення [21, 22].

Третя група включає: мокрий шаровий пиловловлювач відцентрового типу; скруббер; прямопоточковий пиловловлювач типу «МІР-100»; зрошуваний циклон; пиловловлювачі з трубою Вентурі тощо [21, 22].

Четверта група включає: мокрі фільтри звичайної конструкції та з решетом; фільтр шарів та пиловловлювач пінного типу [21, 22].

Для очищення газів значного об'єму широкого застосування набули очисні апарати третьої групи [21, 22]. Мокрі пиловловлювачі за принципом дії поділяються на пінні, зрошувані та комбіновані (дод. А, табл.1.1).

### **1.3. Висновки до розділу 1**

1. Аналіз технологічних процесів очищення і охолодження генераторного газу з біомаси свідчить, що найкраще для очищення газу застосовувати двоступеневу технологію очищення.

2. В якості апаратів для очищення генераторного газу від крупнодисперсних механічних домішок краще застосовувати циклони, які в системах очищення потрібно поєднувати з відцентровими зрошуваними скрубберами, які очищують газ від дрібнодисперсного пилу і смол.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ ВІД МЕХАНІЧНИХ ДОМІШОК І СМОЛ

#### 2.1. Математичне моделювання параметрів процесу і обладнання для очищення генераторного газу від механічних домішок і смол

Для отримання математичних залежностей щодо процесу очищення генераторного газу від пилу в шарі наповнювача слід зробити ряд припущень.

Розглянемо приклад руху частинок пилу в елементарному криволінійному каналі. Вважатимемо, що частина пилу є шаром і не має електричних зарядів; потік газу – потенціальний (усталений в часі); на частинку пилу, що рухається в потоці по криволінійній траєкторії, діє відцентрова сила інерції. Під дією цієї сили частинки пилу починають рухатися відносно молекул газу в напрямку дії відцентрової сили. Цей рух, в свою чергу, спричиняє появу сили опору газового середовища. Силою тяжіння та підйомною силою нехтуємо, оскільки ці сили мають протилежні напрямки, а частинка пилу має незначну масу (розмір частинок 5–30 мкм). Силою зсуву нехтуємо, оскільки вона незначна за величиною.

Застосуємо принцип Д'Аламбера, за яким рівняння руху частинок пилу по криволінійній траєкторії можна представити наступним чином [2]:

$$m\omega^2 / r = f \cdot F \cdot \rho_0 \cdot u^2 / 2. \quad (2.1)$$

Представимо рівняння (2.1) в полярних координатах:

$$\omega = r \frac{d\theta}{dt}; u = \frac{dr}{d\tau}. \quad (2.2)$$

Виразимо масу  $m$  та площу  $F$  через щільність та розміри частинок пилу:

$$m = \pi \delta^3 \rho / 6; F = \pi \delta^2 / 4. \quad (2.3)$$

Так як швидкість руху частинок пилу невелика, можна прийняти, що:

$$f = 24 / \text{Re} = 24\nu / u\delta. \quad (2.4)$$

Підставивши ці вирази в рівняння (2.1) отримаємо:

$$\frac{\pi\delta^3\rho r^2}{6r}\left(\frac{d\theta}{d\tau}\right)^2 = \frac{24v\pi\delta^2\rho_0}{\frac{dr}{d\tau}\delta\cdot 4\cdot 2}\left(\frac{dr}{d\tau}\right)^2. \quad (2.5)$$

Після перетворення рівняння та заміни  $d\theta/d\tau$  через  $\omega$  (кутова швидкість) отримаємо диференціальне рівняння:

$$dr/r = (\delta^2\rho\omega/18v\rho_0)d\theta. \quad (2.6)$$

Припустимо, що кутова швидкість на елементарній траєкторії постійна, тоді, інтегруючи рівняння (2.6) в межах від  $\theta_2$  до  $\theta_1$  і від  $r_1$  до  $r_2$ , отримаємо:

$$\ln r_2 - \ln r_1 = \delta^2\rho\alpha(\theta_2 - \theta_1)/(18v\rho_0). \quad (2.7)$$

Позначаючи  $\delta^2\rho\alpha(\theta_2 - \theta_1)/(18v\rho_0)$  через  $\ln A$  запишемо:

$$\ln r_2 - \ln r_1 = \ln A,$$

$$\text{або } \ln r_2 - \ln r_1 = e^{\ln A}, \text{ або } r_1 = r_2 e^{-\ln A}. \quad (2.8)$$

Скорочуючи ліву і праву частину рівняння (2.8) на  $r_2$ , отримаємо:

$$s = r_2 - r_1 = r_2(1 - e^{-\ln A}), \quad (2.9)$$

або, підставляючи у рівняння (2.8) значення  $A$ , отримаємо довжину шляху  $s$ , який пройшли частинки пилу в напрямку дії сили інерції:

$$s = r_2 \left(1 - e^{-\frac{\delta^2\rho\alpha(\theta_2 - \theta_1)}{18v\rho_0}}\right). \quad (2.10)$$

Застосуємо рівняння (2.10) для визначення залежності кількості пилу в очищеному газі від висоти шару наповнювача, через який проходить газ.

За [3] відомо, що по мірі проходження газу через шар наповнювача, склад пилу в газі змінюється залежно від висоти шару наповнювача, а також від числа поворотів струменів газу в наповнювачі. Слід пам'ятати, що в нашому випадку дійсні рухи частинок пилу і розміри траєкторій досить малі, отже, величину  $r_2$  можна вважати константою.

За [2] кількість пилу, при проходженні газу через шар наповнювача, різко зменшується. Проте, по мірі проходження газу через шар наповнювача, інтенсивність очищення зменшується.

$$dy/dx = -\eta y. \quad (2.11)$$

Виразимо коефіцієнт  $\eta$  через відомі нам величини. Розглянемо приклад елементарного руху однакових частинок пилу при одному повороті струменя. Позначимо через  $x$  концентрацію пилу на вході в канал, а через  $y$  – на виході. Крім того, допустимо ймовірність того, що переріз  $f$  каналу та швидкість  $v$  газу в ньому будуть однаковими. В цьому випадку баланс пилу в криволінійному просторі за одиницю часу опишеться наступним рівнянням [3]:

$$fv y_0 = \beta f_s v y_0 + f v y. \quad (2.12)$$

Після перетворень з (2.12) отримаємо вираз, що є коефіцієнтом очищення газу для одного каналу  $(y_0 - y)/y_0 = \beta \cdot f_s / f$ , тоді коефіцієнт очищення складе:

$$\eta = (y_0 - y)/y_0 = \Delta y / y_0 = \beta (f_s / f). \quad (2.13)$$

де  $\Delta y$  – кількість пилу, що осіла в каналі.

Із рівняння (2.13) видно, що коефіцієнт очищення газу в криволінійному каналі не залежить від кількості пилу в газі на вході в канал.

Проте, коли канал квадратного перерізу і відцентрова сила направлена перпендикулярно одній із сторін, то

$$\eta = \beta f_s / f = \beta (s b / b^2) = \beta s / b, \quad (2.14)$$

де  $b$  – сторона квадрату.

Тоді, виражаючи  $s$  із рівняння (2.14), отримаємо:

$$\eta = \beta \cdot r_2 (1 - e^{-\ln A}) / b. \quad (2.15)$$

Виразимо коефіцієнт  $\eta$  для криволінійного каналу круглого перерізу через відомі нам величини. В цьому випадку площа серпа  $f_s$  виражається досить складною і незручною для користування формулою (2.17). Залежність, виражена цією формулою, при незначних величинах  $s$  наближається до лінійної. Тому, для нашого випадку, можна з точністю прийняти, що величина  $f_s$  в залежності від відношення  $s/D$  ( $D$  – діаметр струменя) змінюється по прямій лінії (до величини  $s/D=0,4$ ). В цьому випадку величина площі  $f_s$ :

$$f_s = \pi R^2 - \pi R^2 + sD = sD. \quad (2.16)$$

Для співвідношення  $s/D$  використано формулу:

$$f_s = R^2 (\pi + \sin \varphi - (\phi \pi / 180)), \quad (2.17)$$

яка наближена до  $f_s = s \cdot D$ .

На основі викладеного, для каналу круглого перерізу матимемо:

$$\eta = \beta(f_s / f) = \beta(4sD / \pi D^2) = \beta(4s / D). \quad (2.18)$$

або, отримаємо:

$$\eta = \beta \cdot 4r_2(1 - e^{-\ln A}) / \pi D. \quad (2.19)$$

Підставляючи значення  $\eta$  із рівняння (2.15) в рівняння (2.12), отримаємо для каналу квадратного перерізу:

$$dy/dx = -\beta(r_2(1 - e^{-\ln A})/b)y. \quad (2.20)$$

Інтегруючи отримаємо:

$$\ln y = -\beta(r_2(1 - e^{-\ln A})/b)x + C;$$

при  $x=0$  та  $y=y_0$  -  $C = \ln y_0$ , рівняння приймає наступний вигляд:

$$y = y_0 e^{-\beta \frac{r_2(1 - e^{-\ln A})}{b} x}. \quad (2.21)$$

Для криволінійного каналу круглого перерізу, підставивши значення коефіцієнта  $\eta$  з рівняння (2.14) в рівняння (2.12) та здійснивши інтегрування:

$$y = y_0 e^{-\beta \frac{4r_2(1 - e^{-\ln A})}{\pi D} x}. \quad (2.22)$$

Зміну вмісту пилу в газі в залежності від висоти наповнювача отримаємо експериментально і більш точно можна виразимо через наступне рівняння:

$$y = y_0 e^{-kx} \quad (2.23)$$

де  $k$  – коефіцієнт, отриманий експериментально;  $x$  – число поворотів газових потоків.

З рівняння (2.22) випливає, що чим більше значення  $k$ , тим ефективніше в шарі наповнювача буде протікати процес очищення газу від механічних домішок. Прирівнюючи рівняння (2.21) та (2.23) отримаємо значення  $k$ :

для квадратного перерізу:

$$k_{кв} = \beta(r_2(1 - e^{-\ln A})/b); \quad (2.24)$$

для каналу круглого перерізу:

$$k_{кр} = \beta(4r_2(1 - e^{-\ln A})/\pi D). \quad (2.25)$$

Підставивши значення  $\ln A = [\delta^2 \rho \alpha (\theta_2 - \theta_1)] / (18 \nu \rho_0)$  в (2.25) маємо:

для каналу квадратного перерізу:

$$k_{кв} = \left( \beta r_2 \left| 1 - e^{-\frac{\delta^2 \rho \omega (\theta_2 - \theta_1)}{18 \nu \rho_0}} \right| \right) / b ; \quad (2.26)$$

для каналу круглого перерізу:

$$k_{кр} = \frac{\beta 4 r_2 \left| 1 - e^{-\frac{\delta^2 \rho \omega (\theta_2 - \theta_1)}{18 \nu \rho_0}} \right|}{\pi D}. \quad (2.27)$$

Поділивши рівняння (2.27) на (2.26), отримаємо, що  $k_{кр} / k_{кв} = 1,274$ , якщо вважати, що  $D=b$ , тобто при каналах круглого перерізу очищення газу від механічних домішок буде відбуватися в шарі наповнювача більш ефективно.

З рівнянь (2.26) і (2.27), можна зробити наступні висновки:

1. Величина  $k$ , тобто ефективність очищення газу, залежить як від природи частинок пилу, газового середовища і ступеня змочування рідиною ( $\delta$ ,  $\rho$ ,  $\rho_0$ ,  $\nu$ ,  $\beta$ ), так і від конструктивних особливостей наповнювача [ $b$ ,  $D$ ,  $r^2$ ,  $(\theta_2 - \theta_1)$ ] та кутової швидкості потоку  $\omega$ .

2. Величина  $k$ , що характеризує процес очищення газу в шарі наповнювача, обернено пропорційна лінійним розмірам каналів ( $b$ ,  $D$ ); іншими словами, при збільшенні дроблення газового потоку на більшу кількість потоків збільшується ефективність очищення газу від частинок пилу.

3. Величина  $k$  прямопропорційна величині, що характеризує зовнішній радіус кола  $r_2$  та коефіцієнту ефективності удару частинок об плівку рідини  $\beta$ .

Виходячи з отриманих формул встановлено наступні положення:

1) ступінь очищення газу від пилу є кращим, якщо частинки пилу в газі порівняно більші, а пори в фільтруючому елементі по можливості менші;

2) здатність фільтруючого елемента утримувати пил зростає при змочуванні фільтрів липкою рідиною (речовиною);

3) по мірі роботи здатність фільтра утримувати пил дещо зростає (переріз проходження каналів зменшується внаслідок осідання пилу) при одночасному збільшенні гідравлічного опору.

Коефіцієнт  $\beta$  в функціональній залежності не представлений, але зважаючи на явища, які протікають, можна вважати, що  $\beta$  є функцією поверхневого натягу застосованої рідини.

Використовуючи рівняння (2.27), теоретично підраховано коефіцієнт  $k$  по усередненим величинам для металевих кілець розміром  $15 \times 15$  мм, в випадку очищення генераторного газу з біомаси, буде рівним 0,011. Тобто значення коефіцієнта  $k$  знаходиться в інтервалі величин, отриманих експериментально.

При використанні рівнянь (2.21) – (2.23) для різних наповнювачів із волокон необхідно вміти підраховувати величину  $x$ , що є кількістю поворотів газових струменів при проходженні потоку газу через шар наповнювача.

Волокна в очищувачі зазвичай розташовані хаотично. Для підрахунку величини  $x$  слід пам'ятати, що волокна в просторі переплітаються в певному порядку, тобто рівномірно розміщені перпендикулярно газовому потоку, створюючи сітку з кроком  $t$  плетіння. Ці сітки розміщені одна над іншою на відстані  $t$  кроку плетіння [2, 3, 6]. Знаючи значення  $t$  та висоту  $H$  наповнювача, число  $x$  поворотів потоків підраховують за формулою:

$$x = H/t. \quad (2.28)$$

Для того щоб математично визначити величину кроку ідеального плетіння, доведемо, що відношення сумарних довжин волокон сіток різних геометричних фігур рівне відношенню площ цих фігур.

Для квадрата  $L_{en} = 8(1 + 2 + 3 + \dots + 0,5n)t = 8t(n^2 + 2n)/(2 \cdot 4) = (n^2 + 2n)t$ , де  $n$  – число переплетінь ( $n=D/t$ );  $t$  – крок плетіння;  $(n^2 + 2n)/8$  – сума арифметичного ряду  $1 + 2 + 3 + \dots + 0,5n$ .

Для описаного квадрата  $L_{on} = 2D(n + 1) = 2n(n + 1)t$ .

Відношення  $L_{en} / L_{on} = [(n^2 + 2n)t] / [2n(n + 1)t] = 0,5(1 + 1/(n + 1))$ .

При досить великих значеннях  $n$ :  $L_{en} / L_{on} = 0,5$ .

В той же час відношення площ квадратів вписаного та описаного колом буде дорівнювати:  $F_{en} / F_{on} = 2R^2 / 4R^2 = 0,5$ .

Відповідно, при значній кількості плетінь:  $L_{en} / L_{on} = F_{en} / F_{on} = 0,5$



Для підрахунку довжини волокон сітки в круглому пиловловлювачі будемо приблизно вважати, що відношення довжини  $L_{кр}$  волокон круглої сітки до довжини  $L_{кв}$  волокон квадратної сітки також рівне відношенню їх площ (круг вписаний в квадрат зі стороною  $D$ ), тобто:  $L_{кр} / L_{кв} = \pi D^2 / 4R^2 = \pi / 4$ , звідки  $L_{кр} = 0,25\pi \cdot L_{кв}$ . При значній кількості плетінь  $n$  можна вважати, що  $L_{кв} \approx 2Dn = 2D^2 / t$ . Оскільки  $n = D/t$ , то для однієї сітки матимемо  $L_{кр} = \pi D^2 / 2t$ .

Довжина волокон  $x$  числа сіток, відповідно числу  $x$  поворотів становить:

$$\sum L_{кр} = \pi D^2 x / 2t = \pi D^2 H / 2t^2 = \pi D^2 H / 2t^2, \quad (2.29)$$

де  $x = H/t$ ;  $H$  – висота наповнювача очищувача.

Довжина волокон наповнювача при висоті, яка рівна  $H$  становитиме:

$$L_H = G / \gamma_H f_H, \quad (2.30)$$

Так як  $L_H = \sum L_{кр}$ , тоді  $\pi D^2 H / 2t^2 = G / \gamma_H f_H$ .

Із цього рівняння отримаємо:

$$t = \sqrt{(\pi D^2 H \gamma_H f_H) / 2G}. \quad (2.31)$$

Для практичних підрахунків рівняння можна трансформувати, виразивши вагу волокон наповнювача через діаметр  $D$  очищувача, висоту  $H$  шару и щільність  $q$  наповнювача  $G = \pi D^2 H q / 4$ .

Знаючи величину  $G$  в рівнянні (2.31), можна іншим чином представити величину кроку плетіння, см:

$$t = \sqrt{(2\pi D^2 H \gamma_H f_H) / \pi D^2 H q} = 2\gamma_H f_H / q \quad (2.32)$$

де  $q$  – в г/см<sup>3</sup>;  $\gamma_H$  – в см<sup>2</sup>;  $f_H$  – в г/см<sup>3</sup>.

Отже, знаючи величину  $x$ , визначену за рівнянням (2.28), і, визначаючи вміст пилу в газі до проходження через наповнювач та після [18], визначимо коефіцієнт  $k$  за рівнянням:  $y = y_0 e^{-kx}$ .

Знаючи величину  $k$  для даного типу наповнювача та вміст пилу в газі на вході в шар наповнювача, можна визначити висоту шару, при якій вміст пилу в очищеному газі буде допустимим. При дослідженні процесу очищення газу від

частинок пилу в випадку наповнювача в основу покладено елементарний випадок руху частинок пилу при одному повороті потоку. Цей же метод покладений в основу теоретичного аналізу явища, відомого із дослідження, при якому коефіцієнт очищення сухих інерційних очищувачів (циклони, мультициклони) не залежить від початкового вмісту пилу в газі [17, 18, 24, 25].

Розглянемо випадок коли частинки пилу рухаються в криволінійному каналі, в якому частинки пилу виділяються із потоку під впливом відцентрової сили. Для наглядного уявлення процесу очищення газу в криволінійному каналі доведемо, що коефіцієнт  $\eta$  очищення газу в каналі є функціональним відношенням довжини шляху, який подолали частинки пилу до ширини каналу. Для цього скористаємося рівнянням (2.17) та виразимо величини  $f_s$  та  $f$  через розміри каналу та пробіг частинки пилу в напрямку дії відцентрової сили.

Тоді площа прямокутного каналу рівна  $f = (r_2 - r_1)c$ , де  $r_2 - r_1 = b$  – ширина каналу;  $c$  – висота каналу  $f_s = sc$ , де  $s$  – величина пробігу частинками у напрямку дії відцентрової сили. Підставляючи ці величини в (2.14), отримаємо:

$$\eta = \beta \frac{sc}{cb} = \beta \frac{s}{b}. \quad (2.33)$$

Отже, коефіцієнтом очищення газу в каналі є функція відношення пробігу частинок пилу (під дією відцентрової сили) до ширини каналу. Зважаючи, що в шарі наповнювача процеси очищення газу від твердих частинок протікають в більш складних умовах і що мають вплив ще й інші фактори (зміна перерізу каналу в результаті осідання пилу, налипання частинок пилу), коефіцієнт очищення в певній мірі залежатиме від початкового вмісту пилу в газі.

## 2.2. Висновки до розділу 2

Здійснено математичне моделювання процесу очищення генераторного газу від механічних домішок і смол в комбінованому очищувачі. Представлено методику, яка дозволяє визначити вміст пилу в газі по мірі його проходження через наповнювачі з різною висотою, поверхнею та площею поперечного перерізу. Аналітично досліджено залежність зміни опору наповнювача від кількості затриманих твердих частинок та кількості змочувальної рідини.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Обладнання та методика проведення експериментальних досліджень

В процесі роботи досліджувалися параметри, які впливають на ступінь очищення та охолодження генераторного газу: тип зрошуваної насадки; щільність зрошування і витрата води; висота шару зрошуваної насадки; швидкість газу в очищувачі. Також проводилися дослідження щодо якісних характеристик забруднень, а саме визначали: дисперсний склад механічних домішок, їх абразивні властивості, фракційний склад смоли.

Робота з дослідження параметрів очищення газу проводилися на експериментальній установці Поліського національного університету з газогенератором, що працює на біомасі [4]. Установка була вдосконалена шляхом включення в базову модель [12] комбінованого очищувача 28 (дод. Б). Параметри газу, що надходили в систему очищення установки, наступні: витрата газу – 65...70 м<sup>3</sup>/год; температура газу – 550...650 °С; вміст вологи – 60...120 г/м<sup>3</sup>; вміст механічних домішок – 0,6...1,0 г/м<sup>3</sup>; смоли – 0,1...0,2 г/м<sup>3</sup>.

Як паливо для газогенератора використовували брикети з лігніну.

Комбінований очищувач 28 складався з насоса 26, мокрої та сухої ступенів. Його основні розміри: діаметр – 0,9 м; висота – 2,7 м. Мокра ступінь – це зрошувана насадковий скруббер 11, в якості насадки до якого можна використати наповнювач як фасонний так і у вигляді шматків (деревне вугілля, керамічні кільця 50×50×5 мм, подрібнена цегла розміром 40×70 мм). Висота зрошуваної насадки складала 0,65 м. Суха ступінь очищення 23 містила фільтрувальну насадку (деревина, металева сітка) загальною висотою 0,9 м. Вода для зрошування мокрої ступені підводилася до розпилювального пристрою 12 чотирма форсунками з діаметром отворів Ø4 мм. Вода з форсунок

подавалася на підвішені, за допомогою двох штанг, сталеві диски. Б'ючись об диски, вода розбризувалася в сторони і вгору у вигляді крапель і частково стікала струменями на насадку. Неочищений газ надходив знизу очищувача і, проходячи вгору через мокру 11 і суху 23 ступені очищення, відбирався через патрубок відбору газу 27 [27, 28].

Витрата води обліковувалася лічильником води. Температура всередині очищувача вимірювалася дистанційним манометричним термометром (діапазон вимірювання від 0 до 400 °С). Опір в окремих вузлах очищувача вимірювався струнним пьезометром. Температура газу на виході та температура води на вході та на виході з очищувача контролювалася термометром. Витрата газу вимірювалася дросельними шайбами. Ступінь забруднення газу визначали з використанням експериментальної установки (дод. В) [27, 28].

Дисперсний склад пилу перед очищувачем визначався аспіраційним методом з використанням фільтра АФА-ВП-20. Після очищувача навіска пилу відбиралася зі стін вигнутого коліна труби, де її осідає найбільша кількість.

Перед проведенням аналізу навіска пилу оброблялася ацетоном з метою видалення смолистих речовин, а потім висушувалася при кімнатній температурі 18–22°С. Дисперсність визначалася методами ситового аналізу і механічного просіювання дрібних фракцій в пневматичному класифікаторі [30].

Методом ситового аналізу визначали дисперсність фракцій з величиною частинок від 42 мкм і вище. Фракції пилу з дисперсністю меншою за 42 мкм визначались методом механічного просіювання в пневмокласифікаторі [30].

Експериментальна робота полягала у визначенні коефіцієнтів очищення газу як для зрошеної насадки 11, так і загального для комбінованого очищувача 28 за методикою [34]. Значення досліджуваного параметра, що впливає на коефіцієнти очищення, змінювалося, а всі інші параметри, які також чинять вплив на ступінь очищення, залишалися незмінними.

Для встановлення залежності коефіцієнта очищення газу від витрати води, вода надходила з системи під тиском 0,1–0,2 МПа, а її витрата варіювалася в межах 300–1200 л/год, або 4,5–19 л/м<sup>3</sup>. Щоб встановити вплив

системи розбризкування води на ступінь очищення газу, система розпилення мокрої ступені очищувача була спроектована аналогічно системі розпилення порожніх форсуноквих скрубєрів. Досліджувалися наступні типи зрошуваної насадки: фасонна – керамічні кільця  $50 \times 50 \times 5$  mm; кускова – деревне вугілля, бита цегла розміром  $40 \times 70$  mm. Кожен тип насадки випробовувався при витратах води 7, 11 і  $15 \text{ л/м}^3$ . Для дослідження впливу швидкості газу в скрубєрі на коефіцієнт його очищення було виготовлено скрубєри таких перерізів (базовий –  $0,5 \text{ м}^2$  і зменшеного –  $0,25 \text{ м}^2$ ). Витрата води складала 7, 11 і  $15 \text{ л/м}^3$ .

В якості насадки також використовували деревну тирсу, але в процесі досліджень від неї довелося відмовитися, оскільки вона, маючи високу насипну щільність ( $320 \dots 580 \text{ кг/м}^3$  при вологості понад 15 %), створювала значний аеродинамічний опір системи, що погіршувало рух газу в очищувачі [27, 28].

У комбінованому очищувачі випробовували насадки висотою 0,65 і 0,9 м, а в скрубєрі з перерізом  $0,25 \text{ м}^2$  – 0,65 м; 1,3 м; 1,95 м. Загальна кількість дослідів по кожному скрубєру складала 30. У зведених таблицях наводяться усереднені дані 2–5 дослідів по кожному досліджуваному фактору, що впливає на ступінь очищення газу. Для проведення досліджень розраховували питому поверхню насадок, яка склала: для кускової насадки –  $42 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , а для фасонної –  $88 \text{ м}^2/\text{м}^3$  при насипній щільності наповнювача 180–230  $\text{кг/м}^3$ . Режим роботи газогенератора і техніко-експлуатаційні параметри газу наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

### Техніко-експлуатаційні параметри генераторного газу [27, 28]

Режим газогенератора	Параметри газу, які відповідають режиму газифікації				Вміст домішок в газі на виході з газогенератора, $\text{г/м}^3$	
	Вологість палива, %	Продуктивність газогенератора за газом, $\text{м}^3/\text{год}$	Температура газу на виході з газогенератора, $^{\circ}\text{C}$	Теплотворна здатність газу, $\text{МДж/м}^3$	Механічні домішки	смоли
3	35	60	545	9,6	1,139	0,230
2	30	62	573	11,8	0,963	0,099
1	25	66	606	13,1	0,819	0,087

### 3.2. Результати дослідження параметрів обладнання для очищення і охолодження генераторного газу з біомаси

В роботі представлені результати дослідження ступеня очищення генераторного газу в мокрій насадці очищувача. Дослідження зазначеного виду насадки цікаве тим, що характер її поверхонь дещо відмінний від сухої, що може відбитися як на охолодженні, так і на очищенні газу [27, 28, 32].

Відповідно до результатів дослідження (дод. Г) кускові насадки з битої цегли і деревного вугілля не показали помітної різниці за ступенем очищення газу в зрошуваній насадці як за механічними домішками (пилом), так і за смолою. При збільшенні кількості води на зрошування від 7 до 15 л/м<sup>3</sup> очищення від механічних домішок в значній мірі покращилося. Так, наприклад, при насадці з битої цегли коефіцієнт очищення зрошуваної насадки очищувача за механічними домішками дорівнював 63,8% при витраті води 7 л/м<sup>3</sup> і збільшився відповідно до 77,4 та 81,7% при витратах води 11 і 15 л/м<sup>3</sup> [27].

Для насадки з деревного вугілля при збільшенні ступеня зрошування з 7 до 15 л/м<sup>3</sup> на першому режимі роботи газогенератора коефіцієнти очищення збільшилися з 65,0 (по механічним домішкам) і 58,1 % (смолам) до 82,3 і 71,0 % відповідно. Коефіцієнти очищення по смолі мало відрізнялися для обох типів кускових насадок. Ця тенденція простежувалася на всіх режимах роботи газогенератора [27].

Відзначимо, що зрошувальні насадкові скрубери придатні для очищення синтез-газів від смол тільки в тому випадку, коли смоли максимально повно розкладаються в самому газогенераторі [29].

Насадка з керамічних кілець показала більш високу ступінь очищення газу як від механічних домішок, так і від смоли. На першому режимі роботи газогенератора при зрошуванні 7 л/м<sup>3</sup> коефіцієнт очищення по механічним домішкам для зрошувальної насадки склав 71,2 % і 63,4 по смолам. При зрошуванні 11 і 15 л/м<sup>3</sup> коефіцієнт очищення по механічним домішкам збільшився до 82,7% і 84,4% і по смолам – до 66,7 і 72,0 % відповідно [27].

З (дод. Г) випливає, що з точки зору очищення генераторного газу раціонально працювати в інтервалі витрат води від 11 до 15 л/м<sup>3</sup>, які, в даному випадку, слід вважати оптимальними. Нестача води (до 11 л/м<sup>3</sup>) не забезпечує необхідний ступінь очищення газу від механічних домішок. При витраті води понад 15 л/м<sup>3</sup> коефіцієнт очищення газу від механічних домішок підвищується лише на 6% (загальний коефіцієнт очищення по механічним домішкам 93 % при витраті води 20 л/м<sup>3</sup> в порівнянні з 86 % при витраті води 15 л/м<sup>3</sup>). Це є малоефективним порівняно з витратами, необхідними для забезпечення системи додатковою водою (понад 5 л/м<sup>3</sup>). За коефіцієнтом очищення газу від смол ця тенденція зберігається [27, 28].

Для охолодження газу достатньою є витрата води 7 л/м<sup>3</sup>, яка забезпечує температуру охолодження газу в межах від 15 до 17 °С при температурі вхідної води в системі 10 °С, і 25–26 °С при температурі вхідної води в системі 20 °С. Однак, при температурі вхідної в систему води 20 °С і витраті води на зрошування 7 л/м<sup>3</sup> температура очищеного газу може досягати 50°С, що негативно може позначитися на роботі регулюючої апаратури ДВЗ.

Результати дослідження ступеня очищення синтез-газу в сухій насадці очищувача після мокрої насадки з витратами води 11 л/м<sup>3</sup> представлено в (дод. Д). В таблиці наведено середні дані п'яти вимірювань при наповнювачі мокрої насадки у вигляді керамічних кілець 50×50×5 мм, оскільки при використанні в комбінованому очищувачі саме цього виду мокрої насадки ступінь очищення генераторного газу найвища [27, 28].

Основна маса механічних домішок і смол уловлюється мокрим очищувачем із зрошуваною насадкою (~ 90–95 %) [27, 28]. Також зафіксовано зміну опору насадок очищувача. Для зрошуваної насадки величина опору склала близько 10 Па, а для насадки сухого очищувача – до 500 Па. Досконало залежність опору системи від типу застосованих насадок і режимів зрошування не досліджувалася. Сумарний опір системи склав близько 670 Па.

Розглянемо вплив витрати води на ступінь очищення газу. Збільшення витрат води на зрошування підвищує ступінь очищення газів, однак, потрібно

дослідити, до яких меж по витраті води ця тенденція зберігатиметься. Верхньою границею щільності зрошування є затоплення [33]. Нижньою границею щільності зрошувальної насадки є та кількість рідини, яка покриває усю поверхню зрошуваної насадки. Експериментально це встановлено шляхом визначення коефіцієнта теплопередачі, який зростає до певного моменту зі збільшенням подачі води. Щільність зрошування, якій відповідає припинення зростання коефіцієнта передачі, і деяке його зменшення вказує на те, що уся поверхня насадки покрита рідиною, що є мінімальною або нижньою границею зрошування. Нижня границя зрошування згідно [35] дорівнює добутку коефіцієнта зрошування на питому поверхню насадки. Проте ця залежність дійсна коли скрубєр працює в режимі охолоджувача [27, 28].

За розрахунками мінімальна щільність зрошування для кускової насадки з розміром шматків  $40 \times 70$  мм становить  $5 \dots 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , а для керамічних кілець  $50 \times 50 \times 5$  –  $10,5 \dots 21 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . Для скрубєра  $\varnothing 0,9$  м з кусковою насадкою витрата води повинна складати  $3 \dots 6 \text{ м}^3/\text{год}$ , а для керамічних кілець –  $6 \dots 13 \text{ м}^3/\text{год}$ . Норми зрошування на  $1 \text{ м}^3$  газу складають  $5 \dots 20 \text{ л/м}^3$  [35]. В наявній водяній системі розробленого комбінованого очищувача витрата води змінювалася в межах  $4,5 \dots 19 \text{ л/м}^3$ . Отже, існуючі норми зрошування відповідали лише другій умові – витраті води на  $1 \text{ м}^3$ , а отримати нижню границю зрошування відповідно до норм щільності зрошування на одиницю площі перерізу скрубєра було можливим лише для кускового типу насадки.

В результаті, розглядаючи мокру ступінь очищувача як насадку скрубєра, отримали велику площу поперечного перерізу при низькій швидкості проходження газу  $0,1 \text{ м/с}$  (при допустимих значеннях цього параметра понад  $1 \text{ м/с}$ ). Комбінований очищувач, розроблений в Поліському національному університеті, навіть за таких умов роботи забезпечив високу ефективність очищення синтез-газу від механічних домішок і смол. Це пояснюється тим, що система розпилення мокрої ступені очищувача була спроектована аналогічно системі розпилення пустотілих форсункових скрубєрів. У зв'язку з цим щільність зрошування мала мінімальний вплив на ступінь очищення газу.



Для визначення витрати зрошувальної води на ступінь охолодження і очищення генераторного газу виконано ряд досліджень для даної системи розбризкування з витратою води від 4,5–19 л/м<sup>3</sup> або від 1 до 4 м<sup>3</sup>/год. Керамічні кільця слугували в якості зрошувальної насадки. В якості палива для газогенератора використовували гранули з соломи, технічні характеристики яких відповідали DIN plus. Результати дослідження залежності ступеня очищення газу від витрат води зрошувальної насадки представлені в (дод. Ж).

З результатів даної серії дослідів випливає, що зі збільшенням витрати води коефіцієнти очищення по механічним домішкам і смолі зростають. Співвідношення значень коефіцієнта очищення для зрошувальної насадки і загального коефіцієнта для механічних домішок і смол повинно залишатися сталим, як і в попередніх дослідах, тобто коефіцієнт очищення по механічним домішкам вищий, ніж по смолі, а зрошувальна насадка вловлює 90–95 % затриманих домішок. Коефіцієнт очищення по механічним домішкам для зрошувальної насадки і загальний зі збільшенням витрати води від 7 до 11 л/м<sup>3</sup> підвищується з 71,2 і 76,96 % до 82,75 і 86,2 %, а далі зі збільшенням витрати до 15 л/м<sup>3</sup> – лише до 84,45 та 87,56 %. Коефіцієнт очищення по смолі при цьому підвищується відповідно з 63,44 і 70,39 до 66,67 та 73,67 і далі 72,04 та 77,63%.

Отже, з точки зору очищення газу, доцільніше працювати в інтервалі витрати води 11–15 л/м<sup>3</sup>, який і слід вважати оптимальним. Щодо витрат води понад 7,0 л/м<sup>3</sup>, то вони, з точки зору охолодження газу, були зайвими. Розрахунок сумарного теплового балансу очищувача показує, що ефект використання води як охолоджувального агента при витратах води понад 7,0 л/м<sup>3</sup> різко знижується. Умовний коефіцієнт використання води при зрошенні 9,5 л/м<sup>3</sup> падає до 87%, а при 14 л/м<sup>3</sup> і вище – до 80 і 75%. Об'ємні коефіцієнти теплопередачі для зрошеної насадки знаходяться в межах 1,186–2,098 МДж/(м<sup>3</sup>·год·°С), а коливання їх значень в зазначеному діапазоні пояснюється різним вихідним вмістом вологи в генераторному газі перед очищувачем, яке змінювалося в межах 38–133 г/м<sup>3</sup>. Величина поверхневих коефіцієнтів теплопередачі для зрошувальної насадки становила 0,0131–

0,0246 МДж/(м<sup>3</sup>·год·°С), що нижче допустимих значень даного параметра для зрошувальних насадок скрубєрів 0,038...0,063 МДж/(м<sup>3</sup>·год·°С) при швидкостях газу в скрубєрі від 1 м/с і вище [27, 28].

Проведено ряд досліджень по залежності ступеня очищення газу від швидкості газу і способу подачі води в комбінований очищувач. З цією метою був виготовлений експериментальний скрубєр перерізом 0,25 м<sup>2</sup>. При цьому висота існуючого очищувача з зрошувальною насадкою з керамічних кілець 50×20×4 не змінювалася. Швидкість газу в очищувачі була збільшена в 2 рази. За (дод. З) кількість механічних домішок і смол в очищеному газі збільшилася практично в 2 рази при максимально можливій витраті води на зрошення в очищувачі рівній 20 л/м<sup>3</sup>. При цьому коефіцієнти очищення газу по двом ступеням зрошення практично не відрізнялися. Якщо порівнювати отримані дані з показниками (дод. Ж), то коефіцієнт очищення зрошувальної насадки з керамічних кілець при такій же витраті води 15 л/м<sup>3</sup> і вологості палива 20% знизився: по механічним домішкам – з 84,4% до 67,9%; по смолі – з 72,0% до 53,81%. Це пояснюється тим, що зменшення перерізу комбінованого очищувача в два рази, у стільки ж разів зменшує об'єм зрошування ступені очищувача і, відповідно, в два рази скорочує поле розпилювання води. Відповідно, процес очищення газу суттєво погіршується [27, 28].

Подальші дослідження були проведені з очисником такого ж перерізу 0,25 м<sup>2</sup>, але з висотою зрошувальної насадки рівною 1,3 м та 1,95 м при швидкості газу 0,2 м/с і представлені в (дод. З). Згідно (дод. З) збільшення висоти і питомого об'єму насадки практично не змінило ступінь очищення газу в порівнянні дослідженнями, представленими в (дод. Д). Таким чином, при розпиленні води форсункового типу висота насадки не відіграє ролі. Це підтвердилося і при зменшенні висоти зрошування насадки з 0,65 до 0,5 м в існуючому очищувачі при діаметрі очищувача Ø0,9 м. Ступінь очищення при цьому практично не змінилася. На частку очищення сухим очищувачем припадає 5–10 % від загальної кількості виносу, що надходить з газогенератора. Його коефіцієнт очищення становить 13–40% в розрахунку, що за вихідну

кількість виносу було прийнято винос, який надійшов з мокрого очищувача в сухий. Швидкість газу в сухому очищувачі не повинна перевищувати 0,2 м/с, оскільки її збільшення призводить до зростання опору системи і коефіцієнт очищення газу знижується. Для очищувача  $\varnothing$  0,9 м і витраті газу 60–68 м<sup>3</sup>/год, виходячи з умови оптимальних термінів заміни насадки, швидкість газу в сухому очищувачі рекомендується прийняти 0,1 м/с. Сухий очищувач виконує функції як додаткового очищення газу, так і затримки залишкової вологи, яка надходить з газом з мокрої ступені очищення [27, 28].

Пил, зібраний в резервуарі з водою зрошувального насадкового скрубера, має зольність вдвічі більшу порівняно з пилом, винесеним з газогенератора (64% в порівнянні з 33%). Зольність пилу, який пройшов через очищувач дорівнює 7%. Викладене свідчить про функції системи очищення більшою мірою вловлювати зольну частина виносу. З урахуванням кількісного вмісту забруднень коефіцієнт очищення газу по зольній складовій пилу вищий за 99%.

Пил, що складається на 93% з частинок вуглецю та сажі, перебуваючи в газі в дрібнодисперсному стані в незначній кількості, повністю повинен згоряти в циліндрах ДВЗ, даючи зольний залишок 6%. Допустимі норми забруднень газу механічними домішками складають 20...30 мг/м<sup>3</sup> і при подачі його, наприклад в ДВС [7], не є обґрунтованими без урахування якісної характеристики абразивності виносу. Дослідження фракційного складу смол і їх фізико-механічних властивостей, при газифікації лігніну, показало, що початкова температура кипіння смоли складає 210 °С. Близько 28,2% смол википає в діапазоні температур 310–335 °С. Вище 335 °С смола перестає переганятися, спінюється і перетворюється в твердий крихкий залишок (30,7%).

Вже при температурі 270 °С в процесі розкладання смоли виділяються гази. Це свідчить про належність смоли до категорії високо-киплячих полімеризованих окислених з'єднань, що є наслідком її проходження через зону високих температур (1200–1500 °С) в зоні окислення газогенератора.

Негативні властивості смоли полягають в її здатності конденсуватися в газопровідній системі та газорозподільних механізмах, виводячи їх з ладу і

утворювати нагар в циліндрах ДВЗ. Під час досліджень низький вміст смол в газі було досягнуто такими заходами: високий ступінь крекінгу смол забезпечила нова конструкція камери газифікації [12] і високі результати по очищенню газу від залишкових смол досягнуто застосуванням розробленої конструкції комбінованого очищувача [27, 28].

### 3.3. Висновки до розділу 3

1. Випробувані три види зрошувальної насадки – деревне вугілля, подрібнена цегла з розміром шматків  $40 \times 70$  мм і керамічні кільця розміром  $50 \times 50 \times 5$  мм – не показали суттєвої різниці за якістю очищення газу від механічних домішок і смол. Це дає підстави вважати, що подрібнена цегла, як місцевий матеріал, при відсутності деревного вугілля чи керамічних кілець, є їх прийнятним заміником.

2. Оптимальною витратою води на охолодження газу є витрата, яка складає  $7 \text{ л/м}^3$ , а на очищення газу  $11\text{--}15 \text{ л/м}^3$ . Зміна висоти зрошувальної насадки з 0,65 до 1,3 і 1,95 не впливає на ступінь очищення газу. Збільшення швидкості газу в комбінованому очищувачі зменшує ступінь його очищення.

3. Дисперсний склад механічних забруднень свідчить, що комбінований очищувач не здійснює повне тонке очищення газу, але на 99% очищає газ від зольних абразивних частинок. Після очищувача 93% забруднень газу складають частинки сажі та вуглецю, які мають незначну абразивність.

4. Смола, що міститься в газі, при надходженні з газом в двигун негативно позначається на його роботі. Високий ступінь крекінгу смол було забезпечено самою конструкцією розробленої газогенераторної установки. Кількість смоли в газі після очищення в комбінованому очищувачі не перевищує  $20\text{--}30 \text{ мг/м}^3$ , що не позначається на роботі як двигуна, так і регулюючої апаратури.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз технологічних процесів очищення і охолодження генераторного газу з біомаси свідчить, що з цією метою найкраще застосовувати двоступеневу технологію очищення. В якості апаратів для очищення генераторного газу від механічних домішок понад 43 мкм краще застосовувати циклони, які в системах очищення потрібно поєднувати з відцентровими зрошувальними скруберами для очищення газу від дрібнодисперсного пилу і смол.

2. Представлено методику, яка дозволяє визначити вміст пилу в генераторному газі по мірі проходження його через наповнювачі з різною висотою, поверхнею та площею поперечного перерізу. Аналітично досліджено залежність зміни опору наповнювача від кількості затриманих твердих частинок та кількості змочувальної рідини.

3. Випробувані три види зрошувальної насадки – деревне вугілля, подрібнена цегла з розміром шматків 40×70 мм і керамічні кільця розміром 50×50×5 мм – не показали суттєвої різниці за якістю очищення газу від механічних домішок і смол. Отже, цегла, як місцевий матеріал, при відсутності деревного вугілля чи керамічних кілець, є їх прийнятним замінником.

4. Оптимальною витратою води на охолодження газу є витрата, яка складає 7 л/м<sup>3</sup>, а на очищення газу 11–15 л/м<sup>3</sup>. Зміна висоти зрошувальної насадки з 0,65 до 1,3 і 1,95 не впливає на ступінь очищення газу. Збільшення швидкості газу в комбінованому очищувачі зменшує ступінь його очищення.

5. Дисперсний склад механічних забруднень свідчить, що комбінований очищувач не здійснює повне тонке очищення газу, але на 99% очищає газ від зольних абразивних частинок. Після очищувача 93% забруднень газу складають частинки сажі та вуглецю, які мають незначну абразивність.

6. Смола в газі, при надходженні з газом в двигун негативно позначається на його роботі. Високий ступінь крекінгу смол було забезпечено самою конструкцією розробленої газогенераторної установки. Кількість смоли в газі після очищення в комбінованому очищувачі не перевищує 20–30 мг/м<sup>3</sup>, що не позначається на роботі як двигуна, так і регулюючої апаратури.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Яценко В. П. Осадження золотих частинок на сферичні колектори у пристроях для мокрої очистки димових газів. Проблеми загальної енергетики. 2012. Вип. 1, № 28. С. 48 – 54.
2. Chapra, S., Canale, R. (2007). Numerical Methods for Engineers (5th ed.). New York : McGrawHill.
3. De Sousa Junior, W. T., Montevechi, J. A. B., de Carvalho Miranda, R., Campos, A. T. (2019). Discrete simulation-based optimization methods for Industrial Engineering problems: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering. doi:10.1016/j.cie.2018.12.073
4. Experimental research of air-steam supply influence on gasification process of low grade fuels / S. Kukharets, N. Tsyvenkova, Ya. Yarosh, I. Grabar, A. Holubenko. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 6. (doi:10.15587/1729-4061.2018.147545).
5. Hoekstra, A. J., Derksen, J. J., Van Den Akker, H. E. A. (1999). An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones, Chemical Engineering Science. 54, 2055–2065.
6. Los, L., Kukharets, S., Tsyvenkova, N., Holubenko, A., Tereshchuk, M. (2017). Substantiation of the structure theory of design of technological machines and devices. Technology audit and production reserves, 5(1 (37)), 48–55.
7. Shraiber A. F., Dubrovskii V. V., Podvysotskii A. M. Experimental study of the laws of interaction between small particles and large drops. Atomization and sprays. 2014. Vol. 24, No. 11. P. 937–947.
8. Федінчик І.В. Вплив режимних параметрів на ефективність мокрої очистки димових газів від частинок золи. Проблеми загальної енергетики. 2013. Вип. 1 (32). С. 50 – 54.
9. Beard K. V. Numerical collision efficiencies for small raindrops colliding with micron size particles. Atoms. Sci. 1974. Vol. 31, No. 2. P. 543 – 550.

10. Susastriawan A. A. P., Saptoad H., Purnomo. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 76(C). P. 989–1003. [doi: 10.1016/j.rser.2017.03.112](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112)
11. Tsyvenkova N., Kukharets S., Kukharets V., Savchenko N. 2020. Experimental study of influence of a tuyere belt design on thermal conditions of gasification chamber operation. *Proceedings of the 19th International Scientific Conference Rural Development*. P. 1248–1254.
12. Tsyvenkova, N. M., Golubenko, A. A., Kukharets, S. M., Biletsky, V. R. (2016). The research of downdraft gas producer heat productivity on straw. *ISB-INMA TEN Agricultural and Mechanical Engineering : Proceedings of International symposium, 27-29 October. 2016. Bucharest, Romania*, 83-91.
13. Підвисоцький О. М., Дубровський В. В., Шрайбер О. А. Узагальнення дослідних даних щодо ефективності уловлювання частинок золи краплями стосовно процесу мокрого очищення димових газів. *Проблеми загальної енергетики*. 2012. Вип. 2(29). С. 35–40.
14. Шрайбер О. А., Дубровський В. В., Підвисоцький О. М., Шрайбер К. О. Оптимізація режиму охолодження циркуляційної води у бризкальних градирнях. *Проблеми загальної енергетики*. 2007. №6. С. 81–86.
15. Алиев, Г. М. (1983). Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок. Москва : *Металлургия*, 1983. 296 с.
16. Альбом принципиальных схем аспирации технологического оборудования ПСМ. Новороссийск, НИПИОТстром, 1967.
17. Вальдберг, А. Ю., Кирсанова, Н. С. (1989). К расчету эффективности циклонных пылеуловителей. *Теоретические основы химической технологии*, 23 (4), 555–556.
18. Василевский, М. В. (2008). Обеспыливания газов инерционными аппаратами. Томск : *Издательство Томского Политехнического Университета*, 258.
19. Дубинін, А. І., Ханік, Я. М., Майструк, В. В., Гаврилів, Р. І. (2004). Вплив довжини поперечно-поточної зони на ефективність пиловловлювача з

кільцевою робочою камерою. Вісник НУ Львівська політехніка Хімія, технологія речовин та їх застосування, 516, 87–89.

20. Коузов, П. А., Мальгин, А. Д., Скрябин, Г. М. (1982). Очистка пыли из газов и воздуха в химической промышленности. Л. : Химия, 1982. 255 с.

21. Куц, В. П., Горішна, Г. П., Марціяш, О. М. (2008). Апарат для мокрого пиловловлювання: доцільність і передумови створення. Науковий вісник НЛТУ України, 18.4, 98–102.

22. Куц, В. П., Марціяш, О. М. (2009). Зниження затрат на очистку запиленних потоків в апаратах комбінованої дії. Наукові праці ОНАХТ, 35 (Т.2), 50–52.

23. Особливості підбору обладнання для очищення генераторного газу / Л. В. Лось, О. Д. Муляр, А. А. Голубенко, Н. М. Цивенкова : Зб. доп. міжвуз. наук.-тех. конф., присвяч 90-річчю ЖНАЕУ «Передові технології сільськогосподарської продукції, енергозбереження та забезпечення тепловою і електричною енергіями. Перспективи та проблеми впровадження в сільське господарство Полісся». Житомир : ЖНАЕУ, 2012. С. 102–108.

24. Павлов, К. Ю. (2008). Разработка технологической операции обеспыливания на наклонном очистителе для хлопка. Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2 (306), 142–144.

25. Разва, А. С. (2009). Оценки гидродинамических параметров циклонных потоков и разработка новых технических решений инерционных пылеуловителей. Томск, 19.

26. Рижов, В. І., Тимошенко, А. Г., Прийомов, С. І. (2015). Оптимізація системи очистки димових газів. Вісник Університету «Україна». Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика, 1 (17), 116–129.

27. Романюк, М. В. (2020). *Дослідження коефіцієнтів очищення синтез-газу в вологій насадці фільтраційного апарату*: матеріали наук.-практ. конф., м. Житомир, 26 жов. 2020 р. Житомир : ПНУ, 2020. С. 42–45.



28. Романюк, М. В. (2020). *Дослідження коефіцієнтів очищення синтез-газу в сухій насадці фільтраційного апарату*: матеріали наук.-практ. конф., м. Житомир, 26 жов. 2020 р. Житомир : ПНУ, 2020. С. 71–74.
29. Русанов, А. А. (1983). *Справочник по пыле- и золоулавливанию*. Москва : Энергоатомиздат, 312.
30. Ужов, В. Н., Вальдберг, А. Ю., Мягков, Б. И., Решидов, И. К. (1981). *Очистка промышленных газов от пыли*. М. : Химия, 1981. 392 с.
31. Халатов, А. А. (1989). *Теория и практика закрученных потоков*. К. : Наук. думка, 192.
32. Цивенкова, Н. М., Романюк, М. В. (2020). *Використання систем очищення генераторного газу*: матеріали наук.-практ. конф., м. Житомир, 26 жов. 2020 р. Житомир : ПНУ, 2020. С. 57–62.
33. Шиляев М. И. Физико-математическая модель конденсационного процесса улавливания субмикронной пыли в форсуночном скруббере / М. И. Шиляев, Е. М. Хромова, А. В. Григорьев и др. // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2011. –Т. 18, № 3. –С. 427 –440
34. Шрайбер, О. А., Антоненко, І. В. (2015). Вплив нерівномірності розподілу щільності зрошування у порожнистому скруббері на ефективність очистки димових газів від твердих частинок. *Проблеми загальної енергетики*, 1 (40), 29–33.
35. Шрайбер, О. А., Федінчик, І. В. (2012). Моделювання процесу мокрої очистки димових газів від леткої золи. *Промышленная теплотехника*, 34(3), 86–92.

# ДОДАТКИ

## Типи пиловловлювачів та їх характеристики

Тип пиловловлювача	Характеристика роботи
Пиловловлювач барботажний [16] (додаток А, рис. 1)	Недоліком є низький ступінь очищення, який складає 50–60%. Це пояснюється тим, що в результаті спливання бульбашки води лише ті абразивні частинки, які лежать на її поверхні змочуються, на відміну від тих, що знаходяться в середині.
Пиловловлювач пінний [16] (додаток А, рис. 2)	Ефективність очищення генераторного газу від пилу складає 92 – 99%. Апарат може працювати в пінному, барботажному і хвильовому режимах (обмеженням є швидкість руху газу). За умов роботи в барботажному режимі генераторний газ зі швидкістю >2 м/с подається на водяні грати. При швидкостях газу в діапазоні від 2 до 5 м/с на гратах утворюється піна. Отже, робочий режим апарата називається пінним. При швидкостях руху генераторного газу понад 5 м/с режим роботи апарату стає хвильовим. Він характеризується зміною висоти пінного шару. Завдяки коливанням, потік газу розбивається на окремі струмені, які спричиняють зростання гідравлічного опору. Ефективним режимом, при якому якість очищення генераторного газу від механічних домішок найвища, вважається пінний.
Відцентровий зрошуваний скрубєр [16] (додаток А, рис. 3)	Ефективність очищення газу від пилу досягає 80%. Генераторні гази (тангенційно) подаються по патрубку підведення газів, прикріпленого до корпусу під кутом 15 <sup>0</sup> , і надходять в нижню частину корпусу апарата циліндричної форми. Швидкість подачі генераторного газу є меншою за 18 м/с. Обертний рух газів в корпусі забезпечується саме такою подачею. На внутрішній поверхні корпусу радіально встановлені форсунки, в які через кільцеву трубу під тиском подається вода. Механічні домішки осаджуються на внутрішній поверхні корпусу під дією відцентрових сил. Частинки змоченого водою пилу разом з нею стікають по внутрішній поверхні корпусу в нижню частину, яка має конічну форму. В скрубєрі забезпечено безперервне видалення шламової води. Очищений генераторний газ відбирається в верхній частині скрубєра через патрубок відбирання очищеного газу. Рухаючись між форсунками вверх, газ повторно очищується від дрібнодисперсного пилу, який коагулює і осідає під дією відцентрових сил.
Швидкісний апарат для очищення газів від пилу з вертикальними насадками [16] (додаток А, рис. 4)	Ефективність очищення генераторного газу від пилу складає близько 97%. Засмічений генераторний газ, рухаючись в корпусі апарату, проходить поміж вертикальними колонами, по яким стікає водяна плівка. Тип розташування колон – шаховий. Потік газу вдаряється об колони, занурюється в водяну плівку і переміщується з плівкою в накопичувальний бункер у вигляді шламу. Рухаючись в просторі між колонами і дифузором генераторний газ усувається через напірну трубу, що звужується за течією (конфузор), вивільнюючись на вертикальних насадках від пилу. Оптимальною вважається швидкість руху газу рівна 5 м/с. Недоліками даного очисного обладнання є: висока металоемність, високотемпературна корозія робочих поверхонь тощо.

Складено на основі джерела [16].

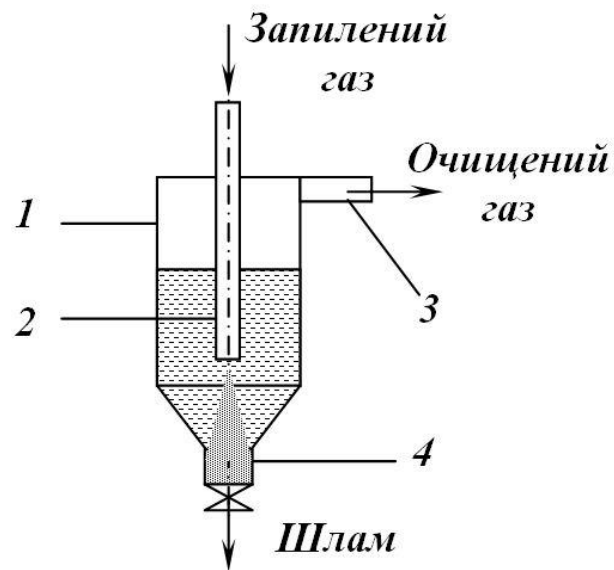


Рис. 1. Схема піловловлювача мокрого типу (барботажного): 1 – комбінований корпус циліндрично-конічного типу; 2 – труба центральна; 3 – патрубок верхній; 4 – патрубок нижній [16].

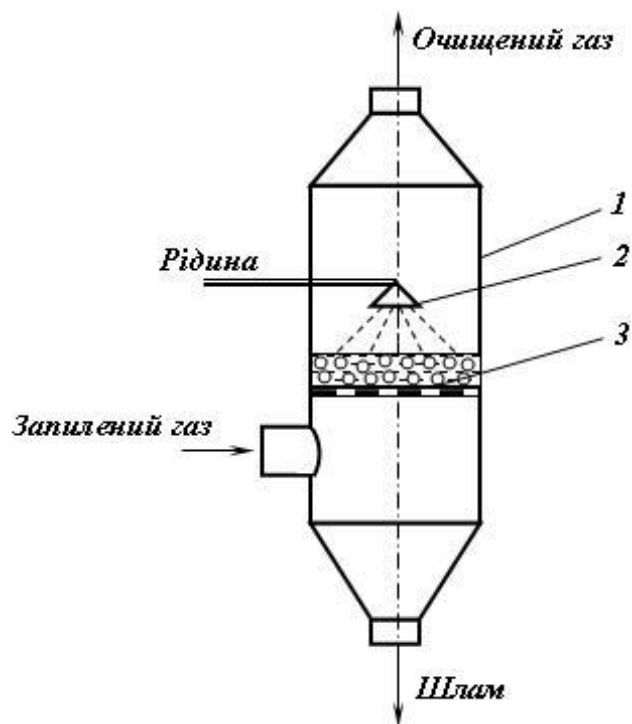


Рис. 2. Схема пінного піловловлювача: 1 – корпус; 2 – пристрій для зрошувальний; 3 – решітка [16].

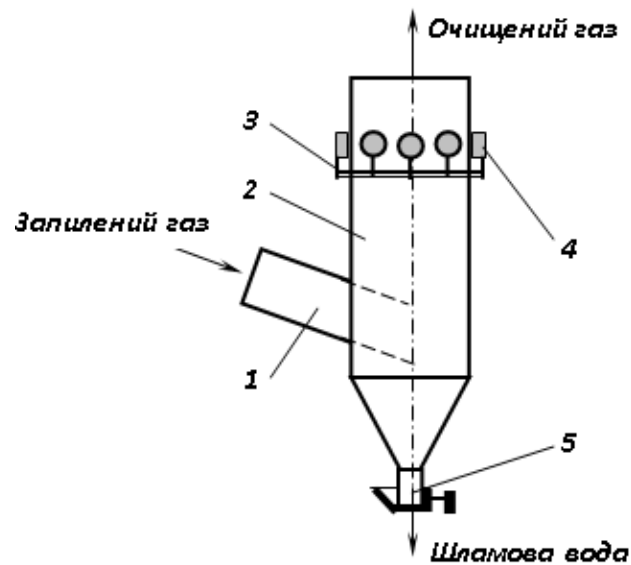


Рис. 3. Схема скрубера відцентрового типу: 1 – патрубок для підведення забрудненого генераторного газу; 2 – корпус; 3 – труба кільцева; 4 – форсунки; 5 – затвор [16].

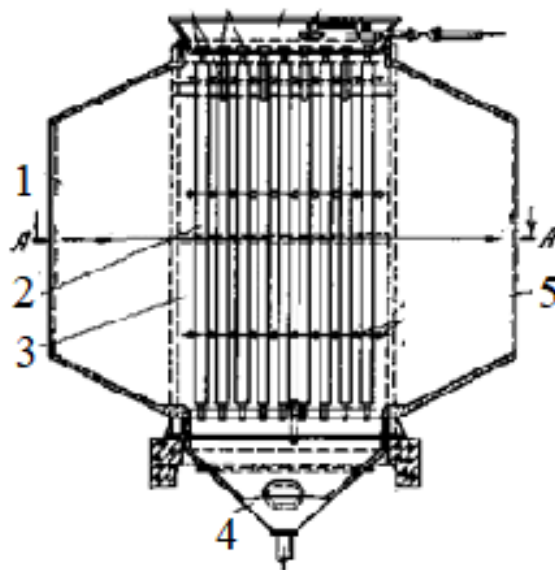
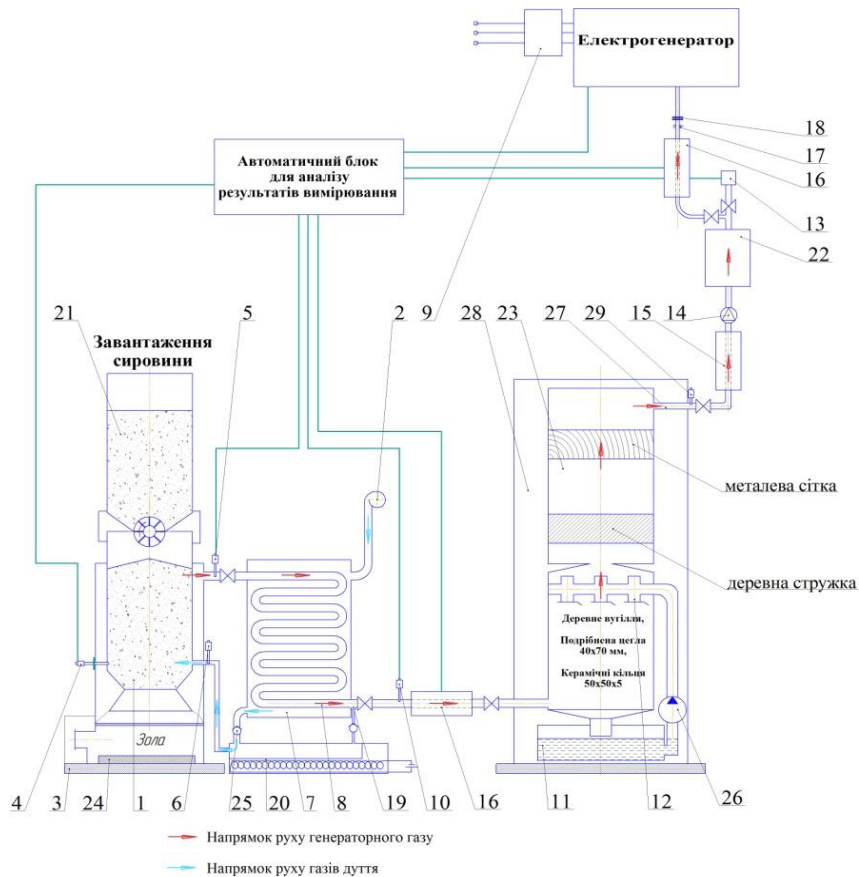


Рис. 4. Загальний вигляд мокрого пиловловлювача плівкового типу з вертикальними насадками: 1 – камера; 2 – колони вертикальні; 3 – дифузор; 4 – бункер; 5 – конфузор [16].



а)



б)

Рис. 1. Експериментальна установка для очищення та охолодження генераторного газу [4]: а – принципова схема; б – загальний вигляд:

1 – газогенератор; 2 – вентилятор; 3 – лабораторні ваги; 4 – термопара С-типу; 5, 6, 10 – термопара К-типу; 7 – газово-повітряний рекуператор; 8 – газова труба; 9 – лічильник електроенергії; 11 – зрошувана насадка скрубера; 12 – спринклер; 13 – калориметр; 14 – вакуумний насос; 15, 16 – обладнання для забору проб газу; 17 – дросельна шайба для регулювання подачі газу; 18 – дросель; 19 – труба зі зворотним клапаном; 20 – випаровувач; 21 – бункер для сировини; 22 – ресивер; 23 – суха ступінь комбінованого очищувача; 24 – ваги; 25 – зворотний клапан; 26 – насос; 27 – труба для подачі газу; 28 – комбінований очищувач; 29 – ртутний термометр.

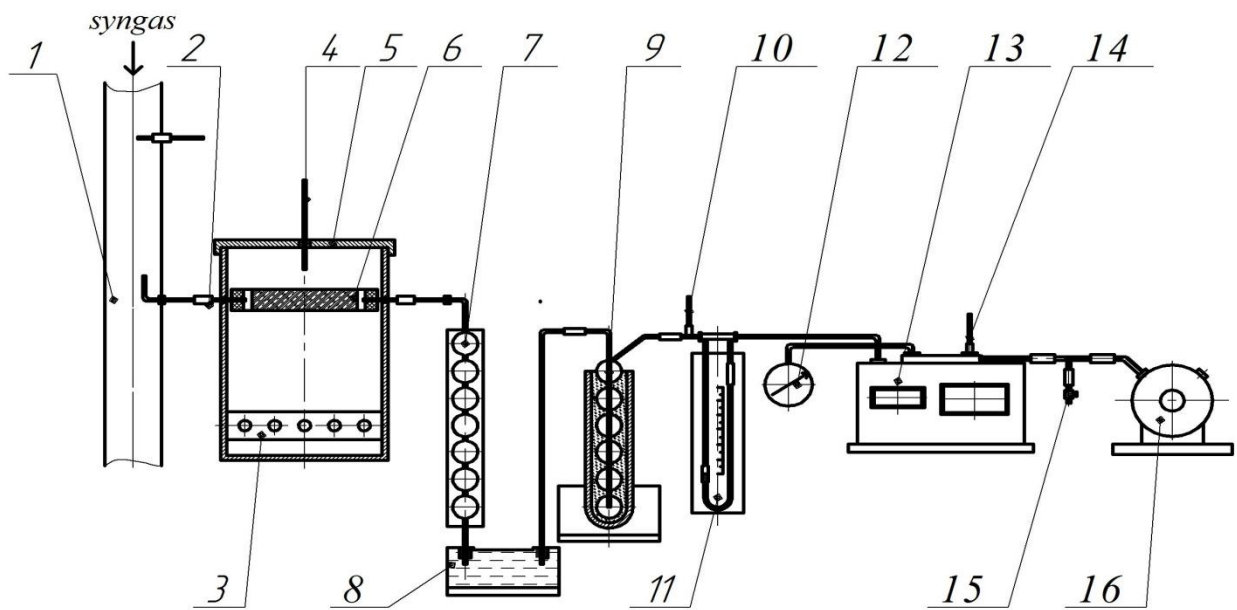


Рис.1. Експериментальна установка для вимірювання вмісту смол і механічних домішок в газі:

1 – труба з газом; 2 – труба для відбирання проб генераторного газу; 3 – нагрівальний елемент; 4 – термопара К-типу; 5 – ємність з термоізоляцією; 6 – фільтрувальний елемент; 7 – охолоджувач газу; 8 – резервуар для конденсату; 9 – конденсатор; 10, 14 – термометр; 11 – аерометр; 12 – манометр; 13 – лічильник газу; 15 – регулятор; 16 – вентилятор

## Додаток Г

Результати дослідження коефіцієнта очищення генераторного газу в  
зрошувальній насадці

Режим газогенератора	Вміст домішок в газі, г/м <sup>3</sup>		Вид наповнювача мокрої насадці	Витрати води 7 л/м <sup>3</sup>				Витрати води 11 л/м <sup>3</sup>				Витрати води 15 л/м <sup>3</sup>			
				Вміст домішок в газі після очищувача, г/м <sup>3</sup>		Коефіцієнт очищення, %		Вміст домішок в газі після очищувача, г/м <sup>3</sup>		Коефіцієнт очищення, %		Вміст домішок в газі після очищувача, г/м <sup>3</sup>		Коефіцієнт очищення, %	
	Механічні включення	смола		Механічні включення	смола	Механічні включення	смола	Механічні включення	смола	Механічні включення	смола	Механічні включення	смола	Механічні включення	смола
1	0,819	0,087	Вугілля	0,277	0,035	66,0	57,1	0,181	0,031	79,1	65,9	0,141	0,028	81,7	69,9
2	0,963	0,099	Вугілля	0,429	0,049	54,9	52,2	0,221	0,043	78,3	60,7	0,188	0,034	79,9	68,0
3	1,139	0,230	Вугілля	0,559	0,110	51,1	53,5	0,268	0,091	76,2	59,8	0,239	0,072	76,3	66,8
1	0,818	0,101	Бита цегла	0,301	0,043	62,7	50,9	0,191	0,037	76,9	62,6	0,148	0,026	80,8	68,7
2	0,969	0,113	Бита цегла	0,448	0,052	53,2	50,1	0,219	0,052	75,2	58,4	0,211	0,037	78,4	66,2
3	1,139	0,232	Бита цегла	0,581	0,109	48,9	48,7	0,291	0,089	74,8	57,7	0,237	0,081	77,5	63,6
1	0,819	0,103	Керамічні кільця	0,241	0,032	70,9	62,9	0,138	0,033	83,1	65,9	0,130	0,031	83,2	71,1
2	0,995	0,098	Керамічні кільця	0,389	0,039	58,8	62,7	0,207	0,036	80,4	67,1	0,181	0,034	81,8	70,8
3	1,139	0,204	Керамічні кільця	0,402	0,087	62,7	59,3	0,239	0,081	78,2	63,3	0,239	0,072	78,9	67,7

## Додаток Д

Результати дослідження коефіцієнта очищення генераторного газу в сухій  
насадці комбінованого очищувача

Режим газогенератора	Вміст домішок в газі до очищувача, г/м <sup>3</sup>		Вміст домішок в газі після очищувача, г/м <sup>3</sup>		Коефіцієнт очищення, %	
	Механічні домішки	Смола	Механічні домішки	Смола	Механічні домішки	Смола
1	0,149	0,081	0,202	0,049	25,3	32,5
2	0,223	0,059	0,184	0,032	20,1	27,3
3	0,361	0,038	0,301	0,028	16,7	23,9



**Результати дослідження впливу витрат води на ступінь очищення  
генераторного газу**

Режим газифікації	Подача води, л/м <sup>3</sup>	Рівень засміченості газу механічними включеннями і смолою, г/м <sup>3</sup>						Коефіцієнт очищення, %			
		До очищувача		Після мокрої ступені		Після сухої ступені		Від механічних включень		Від смол	
		Механічні включення	смола	Механічні включення	смола	Механічні включення	смола	Для мокрої ступені	сумарний	Для мокрої ступені	сумарний
1	7	0,819	0,087	0,241	0,033	0,202	0,030	72,10	77,01	62,98	69,89
2	7	0,963	0,099	0,402	0,039	0,322	0,035	58,06	68,33	61,56	70,93
3	7	1,139	0,230	0,422	0,092	0,341	0,059	64,02	69,89	59,99	72,07
1	11	0,818	0,101	0,138	0,034	0,118	0,027	83,01	87,01	67,03	74,02
2	11	0,969	0,113	0,199	0,041	0,173	0,029	78,99	82,99	65,78	75,33
3	11	1,139	0,232	0,241	0,083	0,196	0,058	76,55	84,12	65,02	76,01
1	15	0,819	0,103	0,131	0,028	0,098	0,019	85,48	88,49	71,93	77,93
2	15	0,995	0,098	0,185	0,029	0,142	0,027	81,99	86,85	70,89	77,68
3	15	1,139	0,204	0,241	0,072	0,193	0,048	80,12	82,33	69,01	76,95

## Додаток З

Коефіцієнт очищення генераторного газу в очищувачі з перерізом 0,25 м<sup>2</sup>

Вологість сировини, %	Витрати води, л/м <sup>3</sup>	Вміст домішок в газі, г/м <sup>3</sup>						Ступінь очищення, %			
		До очищувача		Після зрошуваної насадки		Після сухого очищувача		За механічними домішками		За смолою	
		Механічні домішки	Смоли	Механічні домішки	Смоли	Механічні домішки	Смоли	Для мокрої насадки	Загальний	Для мокрої насадки	Загальний
Висота зрошуваної насадки 1,3 м											
18	15	0,82	0,088	0,319	0,068	0,279	0,050	60,9	65,2	32,2	47,1
22	20	0,101	0,099	0,347	0,061	0,287	0,044	61,8	67,3	47,0	56,9
Висота зрошуваної насадки 1,95 м											
18	15	0,87	0,084	0,305	0,063	0,280	0,042	64,0	68,2	32,9	50,4
22	20	0,89	0,120	0,337	0,052	0,287	0,039	64,1	69,7	52,4	62,7