

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С.Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

«До захисту в ЕК»
Директор інституту
_____ Сергій БЛАЖЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)
« ____ » _____ грудня _____ 2025 р.

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Валентин ПЕТРЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)
« ____ » _____ грудня _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

Зі спеціальності _____ 144 Теплоенергетика _____
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми

_____ Теплоенергетика та енергоефективні технології _____

на тему: Очищення димових газів від золи та діоксиду в мокрому скрубєрі
Вентурі для парового котла середньої потужності

Виконав: здобувач 2 курсу, групи **ТЕ-2-8М**

_____ Гончаренко Дмитро Олегович _____
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник _____ Вольчин Ігор Альбінович _____
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Рецензент _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я, як здобувач Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

_____ Дмитро ГОНЧАРЕНКО _____
(підпис та прізвище здобувача)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад. І.С.Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки


Освітній ступінь магістр

Спеціальність 144 Теплоенергетика
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Теплоенергетика та енергоефективні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЕХТ

 проф. Валентин ПЕТРЕНКО
«17» вересня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Гончаренко Дмитро Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Очищення димових газів від золи та діоксиду в мокрому скрубєрі Вентурі для парового котла середньої потужності

керівник роботи Вольчин Ігор Альбінович проф. док. тех. наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 17.09.2025 № 712-КС

2. Строк подання здобувачем роботи 06.12.2025 року

3. Вихідні дані до роботи: паровий котел, що працює на вугіллі К-35-40 паропродуктивністю 35 т пари за годину, 6 варіантів розрахунку скрубєра Вентурі для температури відхідних газів 140, 150 та 170 °С і також для кожної температури два варіанти тиску води перед скрубєром 100 кПа та 300 кПа., забезпечити зниження вмісту пилу з розрахункової вилучини до 50 мг/м³.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

а). Особливості очищення димових газів при спалюванні твердих побутових відходів,

б). Визначення викидів забруднювальних речовин,

в). Технологічні нормативи допустимих викидів для теплосилових установок номінальною тепловою потужністю до 50 МВт

г). План скорочення викидів від великих спалювальних установок

д). Розрахунки

5. Перелік графічного матеріалу

Види пиловловлювачів, схема спалювання ТПВ, мокрий метод зв'язування кислих сполук димових газів, загальний вид скрубєра вентурі.

Зміст

| | Аркуш |
|---|-------|
| Анотація / Abstract..... | 2 |
| Інформаційний блок..... | 4 |
| Вступ..... | 8 |
| Перелік основних термінів..... | 9 |
| 1. Система очищення димових газів..... | 12 |
| 1.1. Мокрі пиловловлювачі. Загальні дані..... | 12 |
| 1.2. Особливості очищення димових газів при спалюванні твердих побутових відходів (порівняльний аспект) | 18 |
| 1.3. Досвід очищення димових газів Черкаської теплоелектростанції ... | 25 |
| 2. Визначення та план скорочення викидів забруднювальних речовин..... | 34 |
| 2.1. Визначення викидів забруднювальних речовин..... | 34 |
| 2.2. Технологічні нормативи допустимих викидів для теплосилових установок номінальною тепловою потужністю до 50 МВт | 50 |
| 2.3. План скорочення викидів від великих спалювальних установок ... | 59 |
| 3. Розрахункова частина | 64 |
| 3.1. Вихідні данні для розрахунків..... | 64 |
| 3.2. Результати варіантних розрахунків..... | 67 |
| 4. Висновки та рекомендації | 69 |
| Список використаних джерел..... | 71 |
| Додатки | |

| | | | | | | |
|-----|-------|----------|--------|------|-----------------------|-------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Аркуш |
| Зм. | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата | | |

Анотація

У магістерській роботі розглянуто питання зниження викидів твердих частинок при спалюванні вугілля в теплоенергетичних установках шляхом застосування систем мокрого пилоочищення димових газів. Проведено аналіз сучасного стану нормативно-правового регулювання у сфері охорони атмосферного повітря в Україні з урахуванням вимог Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди.

Наведено класифікацію та принципи роботи основних типів мокрих пиловловлювачів, проаналізовано їх технічні та експлуатаційні характеристики. Окрему увагу приділено досвіду очищення димових газів на вугільних теплоелектростанціях України на прикладі Черкаської ТЕС, виконано оцінку ефективності існуючих газоочисних установок та визначено основні причини перевищення нормативних показників викидів забруднюючих речовин.

У розрахунковій частині роботи виконано варіантні інженерні розрахунки скрубера Вентурі як апарата мокрого пилоочищення димових газів вугільного котла паропроductивністю 35 т/год. Досліджено вплив тиску води та режимних параметрів роботи на ефективність уловлювання пилу, гідравлічний опір та габаритні розміри апарата. На основі отриманих результатів обґрунтовано доцільність застосування скрубера Вентурі для підвищення екологічної безпеки теплоенергетичних установок.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні, реконструкції та модернізації систем газоочистки вугільних котлів з метою зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечення відповідності сучасним екологічним вимогам.

Ключові слова: мокре пилоочищення, скрубер Вентурі, димові гази, вугільний котел, теплоенергетика, викиди забруднюючих речовин, екологічна безпека.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

ABSTRACT

This master's thesis addresses the reduction of particulate matter emissions during coal combustion in thermal power plants through the application of wet flue gas cleaning systems. The current regulatory framework for atmospheric air protection in Ukraine is analyzed with consideration of the requirements of the EU Industrial Emissions Directive 2010/75/EU.

The classification and operating principles of the main types of wet dust collectors are presented, and their technical and operational characteristics are analyzed. Particular attention is paid to the experience of flue gas cleaning at coal-fired thermal power plants in Ukraine, using the Cherkasy Thermal Power Plant as a case study. The efficiency of existing gas cleaning equipment is assessed, and the key factors leading to exceedances of regulatory emission limits are identified.

In the calculation part of the thesis, variant engineering calculations of a Venturi scrubber as a wet dust collection device for flue gases of a coal-fired boiler with a steam capacity of 35 t/h are performed. The influence of water pressure and operating parameters on dust collection efficiency, hydraulic resistance, and overall dimensions of the scrubber is investigated. Based on the obtained results, the feasibility of applying a Venturi scrubber to improve the environmental performance of thermal power installations is substantiated.

The results of this study can be used in the design, reconstruction, and modernization of gas cleaning systems for coal-fired boilers in order to reduce environmental impact and ensure compliance with modern environmental standards.

Keywords: wet dust collection, Venturi scrubber, flue gases, coal-fired boiler, thermal power engineering, pollutant emissions, environmental protection.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Інформаційний блок

Актуальність теми. Охорона атмосферного повітря та зниження техногенного навантаження від енергетичних установок є одним із пріоритетних напрямів екологічної політики України. Викиди твердих частинок (пилу) під час спалювання вугілля залишаються суттєвим чинником впливу на довкілля та здоров'я населення. У контексті посилення національних вимог і поступової гармонізації з нормами ЄС актуальним є обґрунтування ефективних технологій пилогазоочищення та їх параметричний розрахунок для конкретних котельних агрегатів. Одним із поширених рішень для уловлення дрібнодисперсного пилу є мокре пилоочищення із застосуванням скрубера Вентурі, що поєднує інтенсивний масообмін і компактність конструкції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано відповідно до тематики науково-дослідних робіт НУХТ та згідно з планами держбюджетних НДР кафедри ТЕХТ НУХТ «Розроблення сучасних енерго- і ресурсозбережних технологій та нанотехнологій для виробництва якісних і безпечних харчових продуктів».

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – виконати розрахунок та обґрунтувати основні параметри апарата мокрого очищення димових газів (скрубера Вентурі) для вугільного котла паропродуктивністю 35 т/год.

- проаналізувати сучасні вимоги законодавства і нормативних документів щодо викидів забруднювальних речовин від енергетичних установок;
- обґрунтувати вибір методу мокрого пилоочищення та типу апарата;
- виконати аеродинамічний і гідравлічний розрахунок скрубера Вентурі та краплевловлювача;
- провести варіантні розрахунки та оцінити вплив тиску/витрати зрошувальної води на показники роботи (ступінь очищення, гідравлічний опір) і габаритні розміри апарата;
- сформулювати рекомендації щодо застосування та експлуатаційних умов (водопідготовка, відведення шламу та стічних вод).

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Об'єкт дослідження. Процес мокрого очищення димових газів вугільного котла.

Предмет дослідження. Параметри та показники роботи системи мокрого пилоочищення димових газів на базі скрубера Вентурі.

Методи дослідження. У роботі використано аналітичні та розрахункові методи: матеріальні баланси, розрахунок газодинамічних і гідравлічних характеристик апарата, емпіричні залежності для оцінювання ефективності уловлення пилу, а також варіантні (параметричні) розрахунки з порівнянням отриманих результатів.

Наукова новизна роботи.

- Уточнено параметричний вплив температури відхідних газів (140–170 °С) та тиску зрошувальної води (100/300 кПа) на розрахункові показники роботи скрубера Вентурі за критерію кінцевої концентрації пилу 50 мг/м³.
- Сформовано узгоджений набір конструктивно-режимних параметрів, що дозволяє порівнювати режими при однаковій кінцевій концентрації пилу 50 мг/м³ та різних початкових концентраціях (~252–257 мг/м³).
- Отримано діапазони ключових параметрів апарата для заданих режимів (швидкість у горловині, діаметр горловини, параметри краплєвловлювача), що можуть бути використані як орієнтири при попередньому проектуванні.

Практичне значення одержаних результатів.

- Розроблені розрахункові дані та підхід до підбору параметрів скрубера Вентурі для вугільного котла К-35-40 можуть бути використані при проектуванні, реконструкції та модернізації систем пилоочистки.
- Таблиця варіантних результатів дає можливість обирати режим за критеріями експлуатації (гідравлічний опір/енерговитрати, вимоги до водяної частини) та оцінювати сумісність з існуючими газоходами.
- Рекомендації щодо контролю перепаду тиску, стабільності зрошення та роботи краплєвловлювача підвищують практичну надійність мокрої газоочистки в реальних умовах.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у підборі методик розрахунку, виконанні варіантних розрахунків, обробленні та узагальненні отриманих результатів, формуванні висновків і рекомендацій.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідались на наукових конференціях і семінарах кафедри ТЕХТ НУХТ.

Публікації. За матеріалами роботи підготовлено 1 тезу доповіді для наукової конференції.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, анотації, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст викладено на 73 сторінках машинописного тексту, наведено таблиці та рисунки.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Вступ

Спалювання вугілля в котлоагрегатах теплоенергетики супроводжується утворенням пилу (леткої золи) та інших забруднювальних речовин, які разом із димовими газами надходять у атмосферне повітря. Найбільш критичним для промислових і міських територій є викид твердих частинок, оскільки дрібнодисперсна фракція погіршує якість повітря, підвищує ризики для здоров'я населення та ускладнює виконання екологічних нормативів.

У сучасних умовах для України актуальним є приведення показників викидів теплоенергетичних установок у відповідність до національних вимог та підходів, гармонізованих із Директивою 2010/75/ЄС про промислові викиди. Значна частина діючих газоочисних установок на вугільних котлах є морально та фізично зношеною, а їх ефективність недостатня для уловлювання тонкодисперсного пилу, що обумовлює перевищення нормативних показників.

Одним із ефективних рішень для інтенсифікації уловлювання пилу є застосування мокрих пиловловлювачів, зокрема скрубера Вентурі. У горловині труби Вентурі формуються високі швидкості газового потоку та дрібнодисперсне зрошення, що підвищує інтенсивність контакту частинок із краплями і забезпечує високу ефективність пилоочищення. Водночас під час вибору параметрів роботи слід враховувати втрати тиску, витрату води, корозійні фактори та вимоги до відведення й очищення шламових стоків.

У даній роботі виконано техніко-екологічне обґрунтування застосування скрубера Вентурі для мокрого пилоочищення димових газів вугільного котла паропродуктивністю 35 т/год. У рамках дослідження проаналізовано нормативні вимоги до викидів, узагальнено принципи роботи мокрих пиловловлювачів, розглянуто практичний стан газоочисного обладнання (на прикладі Черкаської ТЕЦ) та проведено варіантні інженерні розрахунки апарата.

Отримані результати дозволяють оцінити вплив тиску води на вході в скрубера та інших режимних параметрів на ефективність уловлювання пилу, втрати тиску і габаритні характеристики, а також сформулювати рекомендації для проєктування та модернізації систем газоочистки вугільних котлів.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Перелік основних термінів

Вторинні енергетичні ресурси – енергетичний потенціал продукції, відходів, побічних, проміжних та супутніх продуктів, що утворюється під час технологічного процесу і може бути частково або повністю використаний для енергопостачання інших агрегатів (процесів).

Паливно-енергетичні ресурси (ПЕР) – сукупність природних і перетворених видів палива та енергії, що використовуються в національному господарстві.

Раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів – досягнення максимальної ефективності використання ПЕР за наявного рівня розвитку техніки і технологій із одночасним зниженням техногенного впливу на навколишнє природне середовище.

Енергозбереження – організаційна, наукова та практична діяльність, спрямована на раціональне використання й економне витрачання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів, що реалізується із застосуванням технічних, економічних і правових методів.

Питома витрата паливно-енергетичних ресурсів – кількість ПЕР, що споживається енергетичною або технологічною установкою (об'єктом) на одиницю виробленої продукції, виконаної роботи або наданої послуги.

Енергозберігаюча технологія – спосіб виробництва продукції з раціональним використанням енергії, який забезпечує зменшення енергетичного навантаження на довкілля та скорочення енергетичних відходів, що утворюються під час виробництва і експлуатації продукції.

Енергозберігаюча політика – адміністративно-правове та фінансово-економічне регулювання процесів видобування, перероблення, транспортування, зберігання, виробництва й розподілення ПЕР з метою їх раціонального використання та економного витрачання.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Енергетичний менеджмент – система управління енергоспоживанням підприємства, що ґрунтується на регулярних вимірюваннях, аналізі та контролі і забезпечує використання лише необхідної для виробництва кількості енергії; інструмент управління, який дозволяє оцінювати структуру споживання енергоресурсів та визначати шляхи їх оптимального використання (у виробництві, опаленні та інших потребах).

Норма питомих витрат палива та енергії – регламентоване (затверджене уповноваженим органом) значення питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів для конкретного виробництва, процесу, продукції, роботи або послуги встановленої якості, орієнтоване на прогресивні технології.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) – відношення корисно використаної енергії об'єктом до кількості підведеної енергії.

Прямі втрати паливно-енергетичних ресурсів – втрата ПЕР поза технологічними процесами (прояв нераціонального використання).

Нераціональне (неефективне) використання паливно-енергетичних ресурсів – прямі втрати ПЕР, їх марнотратне витрачання та використання понад показники питомих витрат, визначені стандартами (або нормами питомих витрат палива та енергії).

Перевитрати (понаднормативні втрати) – витрати (втрати) паливно-енергетичних ресурсів понад установлені норми та нормативи.

Енергозберігаючі (енергоефективні) заходи – заходи, спрямовані на впровадження та використання енергоефективних технологій, обладнання і продукції з метою зниження споживання ПЕР.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

1. Система очищення димових газів

1.1. Мокрі пиловловлювачі . Загальні дані

Мокрі пиловловлювачі призначені для очищення газів від пилу при пропусканні пилогазової суміші через шар води.

За принципом дії мокрі пиловловлювачі підрозділяються на зрошувані, комбіновані, барботажні і пінні.

Мокрі пиловловлювачі вловлюють пил розміром до 1 мкм з ефективністю до 98-99 %

За принципом дії мокрі пиловловлювачі розділяють на чотири групи:

- плівкові, в яких вода стікає по стінках у вигляді водяних плівок; у них пил осідає і рухається разом з водою (шлами);
- зрошувані, в яких рідина утворює при стіканні водяну завісу, через яку проходить запилений потік повітря;
- комбіновані, такі, що суміщають два перші способи;
- мокрі фільтри, в яких запилене повітря пропускають через шар води або піни.

До першої групи відносяться: зрошуваний циклон, плівковий пиловловлювач з вертикальними насадками, циклон ЛПОТ з водяною плівкою.

До другої групи відносяться: скруббер з насадкою, пиловловлювач шахтного типу, механічний газопромивач, відцентровий турбінний пиловловлювач, багатозонний пиловловлювач, пилоуловлювальна башта з ґратами, горизонтальні пиловловлювачі, камери мокрого очищення.

До третьої групи відносяться: скруббер ВТІ (високотемпературні технологічні інсталяції). Промбудпроект, мокрий шаровий відцентровий пиловловлювач, зрошуваний циклон, прямоточний пиловловлювач МПР-100, пиловловлювачі з трубою Вентурі тощо.

| | | | | | | | |
|-----------|-----------------|----------|--------|------|--------------------------------|-------|---------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | | |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | | |
| Розробив | Гончаренко Д.О. | | | | Літера | Аркуш | Акрушів |
| Перевірів | Вольчин І.А. | | | | | 12 | 73 |
| Н. Контр. | | | | | НУХТ. каф. ТЕХТ гр. ТЕ-2-8М | | |
| Затвердив | Петренко В.П. | | | | | | |

До четвертої групи відносяться: простий мокрий фільтр, мокрий фільтр з решетом, шаровий фільтр і пінні пиловловлювачі.

На практиці широке застосування отримали пиловловлювачі третьої групи. Мокре пиловловлення застосовується для видалення частинок крупністю більше 0,3 мм із запилених газів. А також при очищенні від пилу гарячих і вибухонебезпечних газів.

За принципом дії мокрі пиловловлювачі підрозділяються на зрошувані, комбіновані і пінні.

Барботажні пиловловлювачі Мокрий барботажний пиловловлювач.

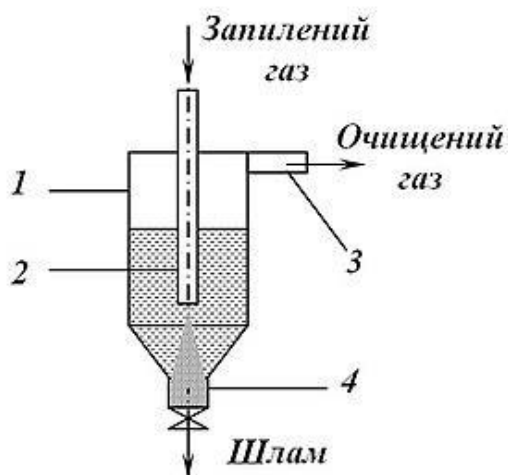


Рис. – Схема мокрого пиловловлювача:

1 – циліндроконічний резервуар;
2 – центральна труба; 3 – верхній патрубок; 4 – нижній патрубок.

Мокрий барботажний пиловловлювач являє собою циліндроконічний резервуар 1 заповнений водою, через яку барботує запилене повітря, що подається по зануреній під шар води центральній трубі 2. При проходженні крізь воду газ звільняється від пилу і видаляється через патрубок 3. Пил осаджується у воді і накопичується у конічній ділянці пиловловлювача, звідки він у вигляді шламу періодично випускається через патрубок 4.

Ступінь очищення газів не перевищує 50 – 60 %, тому що при спливанні бульбашки змочуються тільки частинки, які знаходяться на її поверхні. Частинки пилу, що знаходяться всередині бульбашки, практично не змочуються.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |

Пінні пиловловлювачі

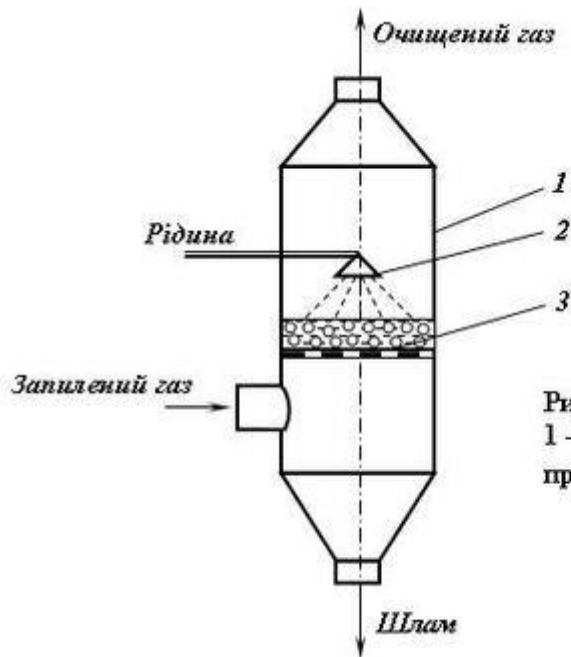


Рис. – Пінний пиловловлювач.
1 – корпус; 2 – зрошувальний пристрій; 3 – решітка (ґратка).

Пінний пиловловлювач складається з корпусу 1, зрошувального пристрою 2 і решітки 3. Пиловловлювач являє собою колону циліндричного або прямокутного перетину, в якій установлені одна або декілька щілинних решіток. Запилені гази подаються знизу під решітку.

Залежно від швидкості руху газів пиловловлювач може працювати в барботажному, пінному і хвильовому режимах. При барботажному режимі газові бульбашки з невисокою швидкістю проходять шар рідини на решітці. При подачі газу з більшою швидкістю на решітці утворюється шар турбулізованої рідини (піни) – пиловловлювач працює в пінному режимі. Якщо швидкість потоку газів велика, відбуваються коливальні зміни висоти шару піни, створюються газові струмені, зростають гідравлічний опір і винесення бризок – усе це характеризує хвильовий режим роботи пиловловлювача. Найбільш ефективний пінний режим, який забезпечує найкращі умови для підводу частинок пилу до турбулізованих плівок рідини.

Ефективність уловлення пилу у пінних апаратах становить 92 – 99 %.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 14 |

Відцентровий зрошуваний скруббер

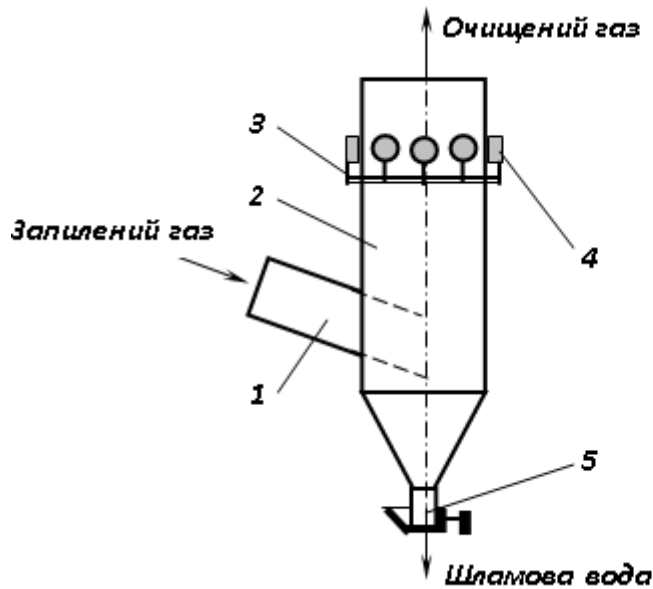


Рис. – Відцентровий скруббер: 1 – вхідний патрубок; 2 – корпус; 3 – кільцева труба; 4 – форсунки; 5 – затвор.

У відцентровий скруббер (рис.) запилені гази із швидкістю до 20 м/с подають тангенціально по патрубку 1 в нижню частину циліндричного корпусу 2. Завдяки такій подачі гази набувають в середині корпусу обертального руху. Частинки під дією відцентрових сил осаджуються на внутрішній поверхні корпусу.

У верхній частині корпусу по колу закріплені форсунки 4, в які під тиском надходить вода з кільцевої труби 3. Струмені води з форсунок подаються тангенціально до внутрішньої поверхні корпусу в бік обертання газового потоку. Вода стікає по поверхні корпусу, змочує частинки і виносить їх в нижню конічну частину, з якої шламова вода безперервно видаляється через затвор 5. Газ всередині скруббера обертається, підіймається угору і при проходженні між форсунками додатково очищується від відносно дрібних частинок, які коагулюють і осідають під дією сили ваги.

Ефективність уловлення пилу у відцентрових скрубберах складає до 80%.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 15 |

Швидкісні пиловловлювачі

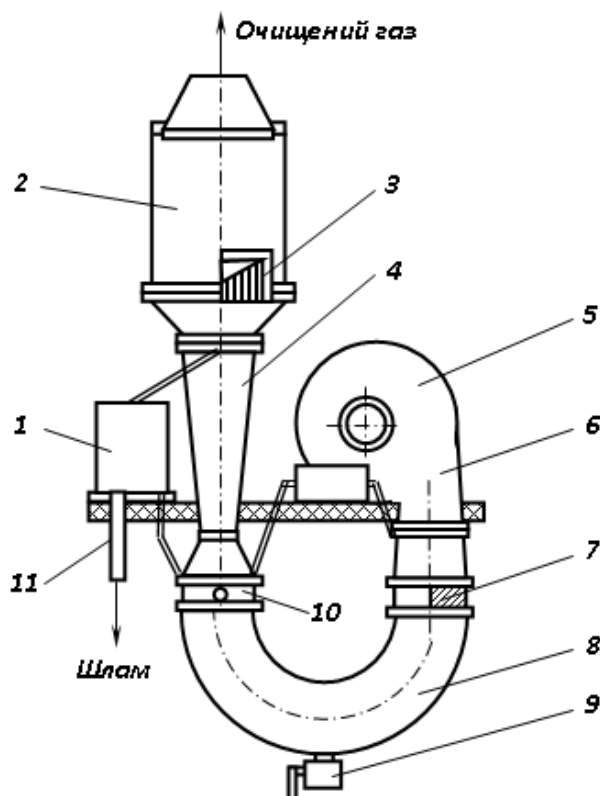


Рис. 4.2 – Швидкісний

пиловловлювач: 1 – приймальний бак; 2 – бризковловлювач; 3 – закрутлюча решітка; 4 – труба Вентурі; 5 – димосос; 6 – патрубок; 7 – жалюзійні решітки; 8 – закруглений трубопровід; 9 – гідрозатвор; 10 – форсунки; 11 – зливна труба.

Швидкісні пиловловлювачі складаються з труби Вентурі і відцентрового краплевловлювача. Загальна конструктивна ознака цих пиловловлювачів – наявність труби розпилювача, де відбувається інтенсивне дроблення газовим потоком рідини, яка його зрошує. Швидкість газового потоку в трубі Вентурі коливається від 40 до 150 м/с.

Швидкісні пиловловлювачі застосовують для остаточного очищення запилених газів в системах пиловловлення сушарок. Ефективність уловлення пилу в швидкісних пиловловлювачах складає 96 – 98 %.

| | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата |

00.KMP.144.003.001.ПЗ

Арку

16

Плівковий пиловловлювач

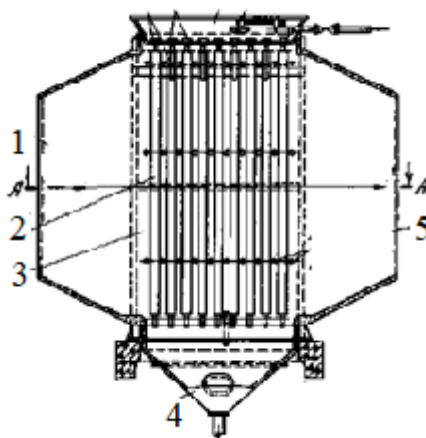


Рис.5 Плівковий мокрий пиловловлювач з вертикальними насадками, загальний вигляд: 1 – камера; 2 – вертикальні колонки; 3 – дифузор; 4 – бункер; 5 – конфузор;

У плівковому пиловловлювачі з вертикальними насадками (рис.5) запилений газ, просуваючись по камері 1, зустрічає на своєму шляху вертикальні колонки 2, по яких стікає вниз плівка води. Колонки розташовані в шаховому порядку. Потік частинок зіштовхується з колонками, занурюється в плівку води і рухається разом з нею у вигляді шламу в бункер 4. Пройшовши дифузор 3 і простір між колонками, газ видаляється через конфузор 5, залишаючи на насадках пил. Оптимальна швидкість потоку газу $v = 5$ м/с. Ступінь очищення газу пиловловлювачем з вертикальними насадками досить високий (~97%), але наявні недоліки (чутливість апарату до ступеня очищення, великі витрати металу, корозія тощо.) обмежують його застосування.

Скрубер ВТІ "Промбудпроект"

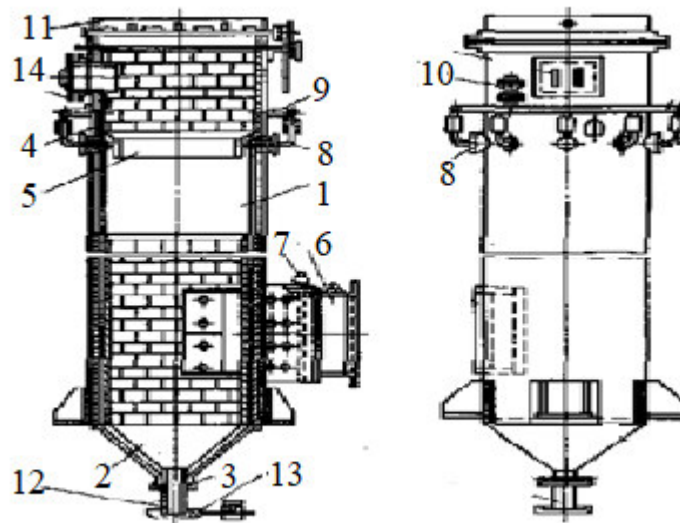


Рис. 6 Скрубєрний пиловловлювач: 1 – циліндр; 2 – конус; 3 – фланець; 4 – кільце; 5 – фартух; 6 – дифузор; 7 – шибер; 8 – форсунки; 9 – трубопровід; 10 – вентиль; 11 – клапан; 12 – патрубок; 13 – затвор; 14 – лаз.

Застосовується на вуглезбагачувальних фабриках при остаточному очищенні газу труб-сушарок, хоча він і поступається за ефективністю прямоточному пиловловлювачу.

Ефективність уловлювання пилу складає 96–97%. До переваг цих пиловловлювачів відносяться: уловлювання пилу невеликого розміру, високий ККД, простота конструкції, невеликі витрати на споруди.

1. 2 Особливості очищення димових газів при спалюванні твердих побутових відходів (порівняльний аспект)

Наведені нижче положення щодо очищення димових газів під час спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) розглядаються як порівняльний приклад сучасних екологічних підходів і жорстких нормативних вимог до промислових викидів. Практика газоочистки на сміттєспалювальних установках характеризується підвищеними вимогами до уловлення твердих частинок і супутніх забруднювачів, що є корисним орієнтиром для модернізації газоочисного обладнання енергетичних котлів.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 18 |

Використання цього порівняння дозволяє обґрунтувати актуальність підвищення ефективності пилоочищення і для вугільних котлів, оскільки тонкодисперсний пил (летка зола) формує основну екологічну проблему при спалюванні вугілля. Далі в роботі основний акцент зроблено на мокрому пилоочищенні димових газів вугільного котла із застосуванням скрубера Вентурі.

Зростаюче утворення відходів на планеті є платою людства за цивілізацію. В розвинутих країнах світу кожен містянин в середньому генерує від 250 до 350 кг побутового сміття щороку. Щоб не захлинутися в цьому потоці сміття слід займатися його знешкодженням та утилізацією. Найбільш застосований в минулому варіант його складування на полігонах твердих побутових відходів на сьогодні є неприйнятним через переповнення полігонів. В Україні площа таких полігонів може досягти площі однієї області, якщо не приймати необхідних заходів. Спалювання сміття є одним з таких заходів, який дозволяє не тільки знешкодити шкідливий вплив розкладення відходів на атмосферне повітря, ґрунтові води та довкілля, але й суттєво зменшити їх об'єм.

На сміттєспалювальних заводах при спалюванні відходів утворюється теплова та електрична енергія. Одночасно з виробництвом тепла та електроенергії, димові гази, що утворюються в процесі згоряння, мають виходити в атмосферу контрольованим способом через систему очищення.

Вимоги Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди щодо спалювання сміття

Таблиця 1

| Забруднююча речовина | Директива 2010/75 |
|--|----------------------|
| Загальний пил | 10 мг/м ³ |
| Газоподібні та пароподібні органічні речовини, що виражені як загальний органічний вуглець (ЗОВ) | 10 мг/м ³ |
| Хлористий водень HCl | 10 мг/м ³ |
| Фтористий водень HF | 1 мг/м ³ |
| Діоксид сірки SO ₂ | 50 мг/м ³ |

| | |
|---|--------------------------------|
| Оксиди азоту | 200 мг/м ³ |
| Оксид вуглецю CO | 50 мг/м ³ |
| Кадмій та талій | Сумарно 0,05 мг/м ³ |
| Ртуть та її сполуки в перерахунку на ртуть (Hg) | 0,05 мг/м ³ |
| Інші важкі метали (Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V) | Сумарно 0,5 мг/м ³ |
| Діоксини і фурани | 0,1 нг/м ³ |

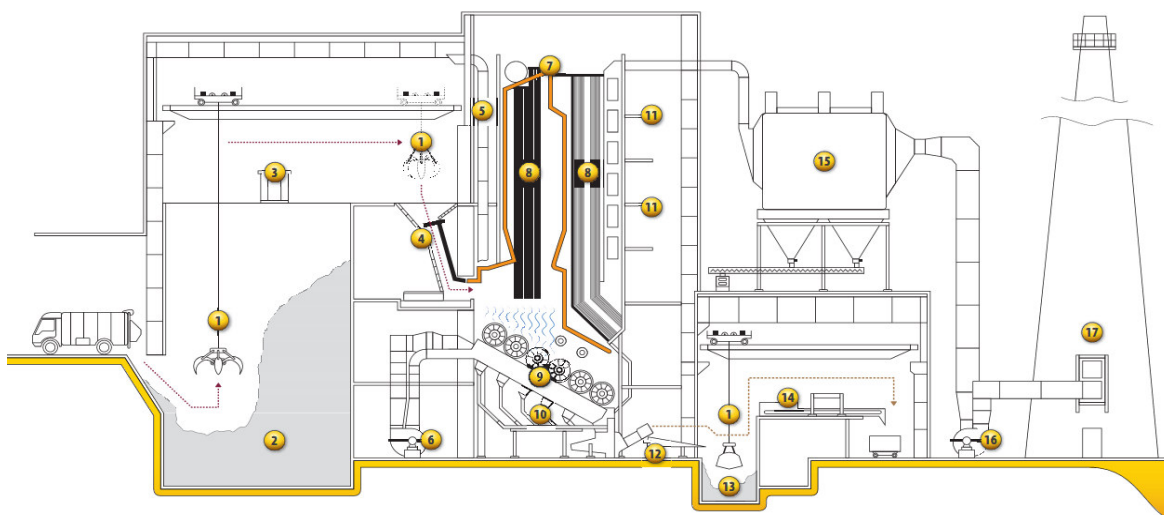


Рис 7. Схема спалювання ТПВ на котлі сміттєспалювального заводу «Енергія», Київ

1 – грейферний кран, 2 – бункер ТПВ (18 000 м³), 3 – кабіна керування краном, 4 – Завантажувальна воронка, 5 – повітропровід, 6 – вентилятор первинного повітря, 7 – котел, 8 – екрани для відведення тепла, 9 – валкова решітка, 10 – лійки для виведення шлаку, 11 – майданчики обслуговування, 12 – похилий транспортер, 13 – бункер шлаку, 14 – лінія металовідбору, 15 – електрофільтр, 16 – димосос, 17 – димова труба

Порівняння екологічних показників заводу «Енергія» та вимог Директиви 2010/75 про промислові викиди

| Речовина | Завод «Енергія» | Директива 2010/75/EU |
|------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Діоксид сірки | 200 мг/м ³ | 50 мг/м ³ |
| Оксиди азоту | 350 мг/м ³ | 200 мг/м ³ |
| Пил (до електрофільтра) | 2500 мг/м ³ | 10 мг/м ³ |
| Пил (після електрофільтра) | 50 мг/м ³ | 10 мг/м ³ |
| Хлориди в перерахунку на HCl | 160 мг/м ³ | 10 мг/м ³ |
| Фториди в перерахунку на HF | 1,5 мг/м ³ | 1,0 мг/м ³ |

| | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата |
|-----|------|----------|--------|------|

00.KMP.144.003.001.ПЗ

Арку

20

| | | |
|------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Важкі метали (сумарно) | 1,2 мг/м ³ | 0,5 мг/м ³ |
| Ртуть | Нема даних | 0.05 мг/м ³ |
| Кадмій + талій | Нема даних | 0,05 мг/м ³ |
| Діоксини та фурани | Нема даних | 0,1 нг/нм ³ (TEQ) |

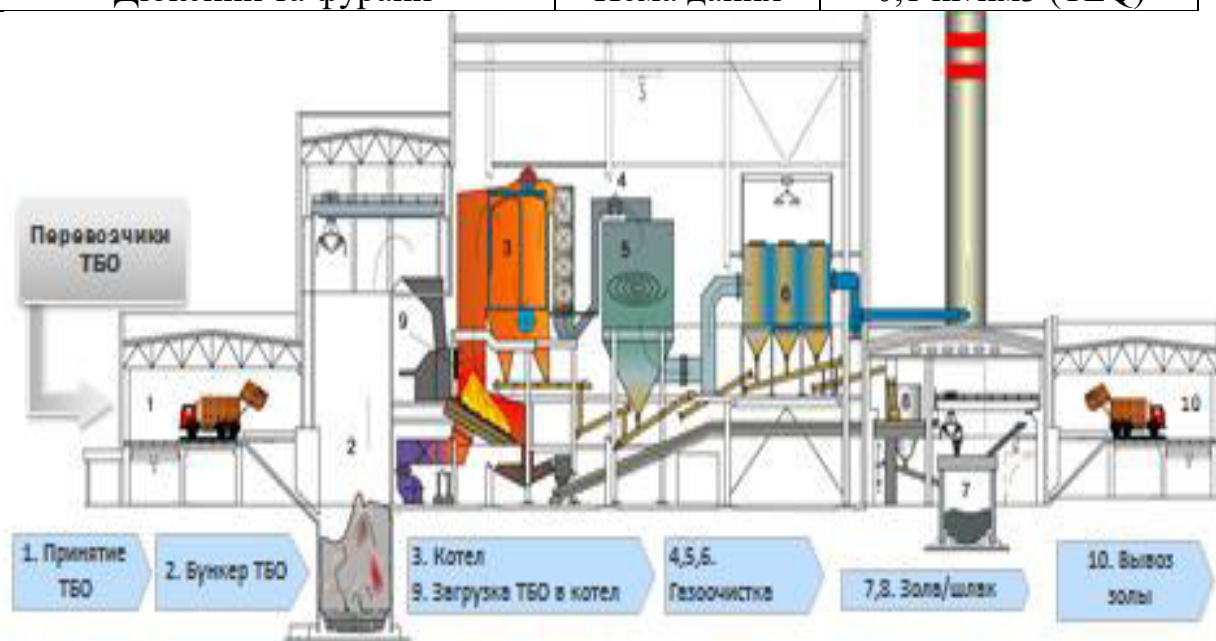


Рис.8. Типова схема сучасного сміттєспалювального заводу

Вміст речовин в неочищених димових газах після котла на установках спалювання відходів (O₂ -11%)

Таблиця 2

| Речовина | Одиниця | Спа-ння ТПВ | Директива 2010/75 | Ступінь очистки, % |
|---|--------------------------|-------------|-------------------|--------------------|
| Пил | мг/нм ³ | 1000-5000 | 10 | 95-99 |
| Оксид вуглецю | мг/нм ³ | 5-50 | 50 | 0-10 |
| ЗОВ | мг/нм ³ | 1-10 | 10 | – |
| ПХДД/ПХДФ | нг/нм ³ (TEQ) | 0.5-10 | 0,1 | 80-99 |
| Ртуть | мг/нм ³ | 0.05-0,5 | 0,05 | 0-90% |
| Кадмій і талій | мг/нм ³ | < 3 | 0,05 | < 98,3 |
| Інші важкі метали (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn) | мг/нм ³ | < 50 | 0,5 | < 99 |

| | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата |
|-----|------|----------|--------|------|

00.KMP.144.003.001.ПЗ

Арку

21

| | | | | |
|---|--------------------|----------|-----|---------|
| Неорганічні сполуки хлору (як HCl) | мг/нм ³ | 500-2000 | 10 | 98-99,5 |
| Неорганічні сполуки фтору (як HF) | мг/нм ³ | 5-20 | 1 | 80-95 |
| Діоксид сірки SO ₂ | мг/нм ³ | 200-1000 | 50 | 75-95 |
| Оксиди азоту в перерахунку на NO ₂ | мг/нм ³ | 250-500 | 200 | 5-60 |

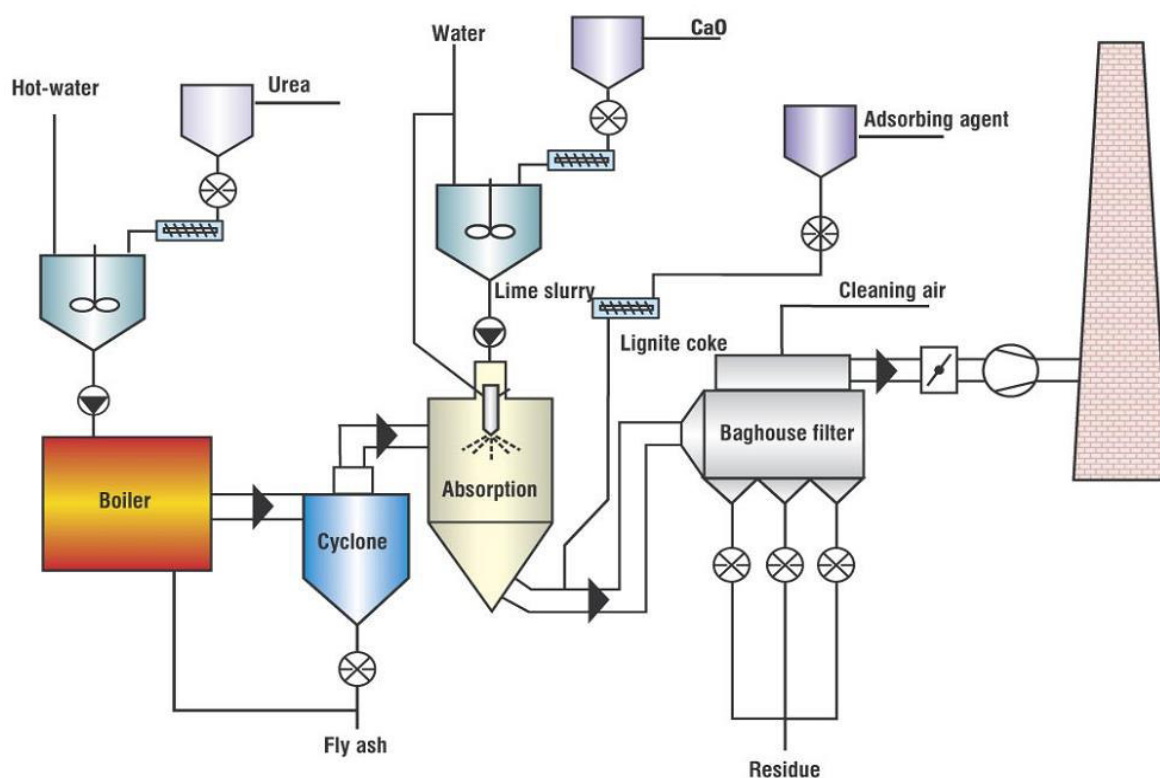


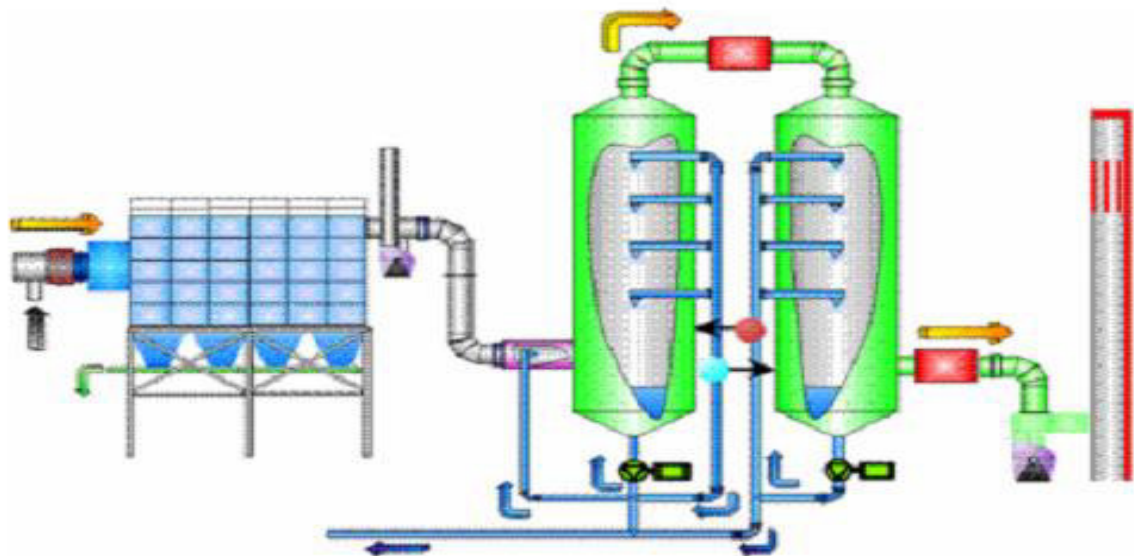
Рис. 9. Технологічна схема зниження викидів забруднюючих речовин при спалюванні твердих побутових відходів

| | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата |

00.KMP.144.003.001.ПЗ

Арку

22



Typical wet process (2 stages) with upstream de-duster

Рис.10.Мокрий метод зв'язування кислих сполук димових газів

Сорбенти: CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Продукт – мокра пульпа, що містить сульфат кальцію. Ефективність – до 98 %. Попереднє пилоочищення. Необхідна обробка стічних вод

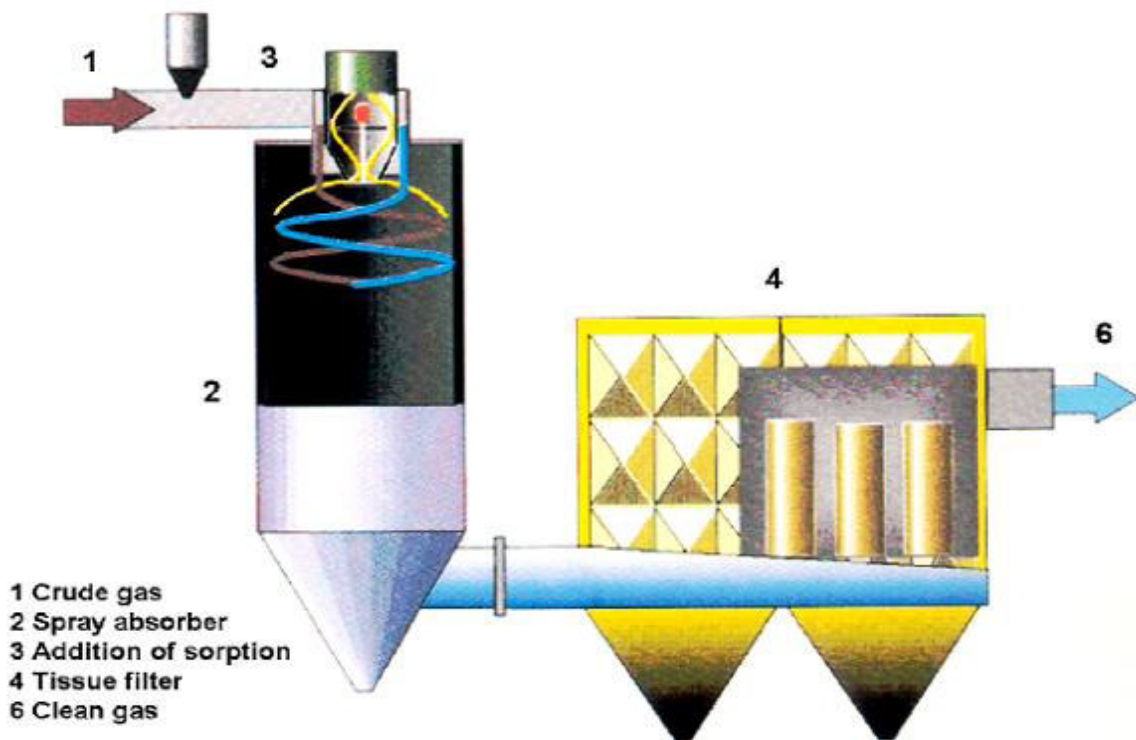


Рис.11.Принцип дії розпилювального абсорбера для зв'язування кислих сполук димових газів

Сорбенти: $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaHCO_3 Продукт – сухий порошок сульфїту, сульфату, хлориду, фториду Ефективність – до 95 %

Технології скорочення викидів оксиду вуглецю, ЗОВ, діоксинів і фуранів

Оскільки оксид вуглецю CO та загальний органічний вуглець є продуктами неповного згоряння палива (хімічний недопал), то основним методом зменшення їх вмісту є оптимальна організація процесу спалювання в котлі.

Для попередження утворення діоксинів (ПХДД) та фуранів (ПХДФ) при спалюванні твердих побутових відходів необхідно забезпечити в зоні горіння температуру факела не менше $850\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 2 секунд і більше.

Для додаткового очищення пропонується застосування технології уведення активованого вугілля як адсорбенту в газохід перед тканинним фільтром тонкого очищення.

Технології скорочення викидів важких металів

Сполуки важких металів є складовою мінеральної частини сміття як палива. Тому основним методом їх уловлення є застосування засобів зв'язування золи (електрофільтрів чи циклонів на 1 етапі та тканинних фільтрів на 2 етапі)

Для уловлення сполук ртуті, які є леткими речовинами при перебуванні димових газів в котлі, застосовується весь спектр газоочисних заходів – від реакторів хімічного очищення до адсорбції активованим вугіллям з осадженням в тканинному фільтрі тонкого очищення.

Уловлений в тканинному фільтрі порошок, що буде містити продукти хімічного очищення, дрібні частинки легкої золи та використане активоване вугілля (з важкими металами), як правило, складується на полігоні. При змішуванні з цементом, піском і водою може застосовуватися як бетон для укріплення стінок полігону.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

Таким чином, аналіз підходів до газоочистки в установках зі спалюванням ТПВ демонструє тенденцію до посилення вимог щодо викидів та підтверджує необхідність застосування високоефективних апаратів уловлення твердих частинок. У наступному підрозділі розглянуто практичний стан газоочисного обладнання на вугільних енергетичних об'єктах (на прикладі Черкаської ТЕЦ), що слугує обґрунтуванням вибору мокрого пилоочищення та подальших розрахунків скрубера Вентурі.

1.3. Досвід очищення димових газів Черкаської теплоелектростанції

В останні роки в Україні як і у всьому світі спостерігається стійка тенденція збільшення використання в теплоенергетиці частки вугілля. Так, наприклад, в 2001р. в Україні частка вугілля в паливному балансі крупних ТЕС складала більше 60%, а в 1990р. — тільки 33% [3]. В прогнозованому паливному балансі приросту енергетичних потужностей країн світу (665 ГВт) вугілля буде забезпечувати 35%, газ — 21%, мазут—5%. Вже сьогодні частка вугілля в паливному балансі Польщі складає 97%, Австралії— 85%, США — 57%. На теплоелектростанціях України, загальна потужність яких складає 36,4 млн. кВт (68,8% сумарної встановленої потужності електростанцій), із 104 енергоблоків 96 працюють на вугільному паливі. Прогнозовані запаси вугілля в Україні (117,3 млрд. т) і зростаючі ціни на природний газ, що експортується з Росії, дають привід розглядати сучасну теплоенергетику як пріоритетну галузь, а вугілля — як основний первинний енергетичний ресурс. При цьому має місце погіршення якості вугілля. За останні 15–20 років зольність твердого палива зросла від 26 до 38%. Використання такого вугілля для потреб енергетики, в умовах коли 62% пиловугільних потужностей ТЕС оснащено електрофільтрами, ефективність золоуловлювання (η) яких складає 92-99%, 35%— мокрими золоуловлювачами ($\eta=92-96\%$) і 3% — циклонами ($\eta\leq 90\%$), призводить до того, що викиди золи в атмосферу складають більше 500 тис. т на рік [4-8].

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 25 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Продовжують зростати і питомі викиди на 1 кВт/рік виробленої енергії, що обумовлено

старінням обладнання (96% обладнання ТЕС вже відпрацювало свій ресурс, 73% — перевищили граничний термін експлуатації) та порушенням технологічних процесів [9]. Часто з метою економії палива теплові енергоблоки переводять у нерозрахований за проектом маневрений режим — тобто зупиняють під час нічного зниження споживання — «провалу» навантаження, а вдосвіта енергоблок запускають знову. Такі часті цикли «пуск-стоп» прискорюють зношеність обладнання, а також ведуть до збільшення питомих витрат палива на виробництво електроенергії і, як наслідок, до збільшення викидів в атмосферу [10].

Таким чином, збільшення частки вугільних ТЕС у системі енергозабезпечення України з одночасним погіршенням якості викопного органічного палива, яке використовується в енергетичній галузі, використання застарілого неефективного обладнання і технологій, збільшує кількість полутантів, що надходять в усі геосфери, і дестабілізує стан навколишнього природного середовища.

Для зменшення забруднення довкілля підприємствами теплоенергетичної галузі державою застосовуються як адміністративні, так і економічні методи регулювання [11]. Актуальним на сьогодні є паливна політика, модернізація і реконструкція генерируючого і газоочисного обладнання, зниження втрат при передачі енергії споживачам. Досвід деяких теплоелектростанцій України показує, що навіть без реконструкції ТЕС, тільки за рахунок зміни паливної політики можна досягти значного скорочення викидів забруднюючих речовин. На одній із ТЕС України перехід на спалювання вугілля, яке надходило на ТЕС після попереднього збагачення, забезпечило зниження питомих викидів SO₂ на 32-37% (в перерахунку на 1 кВт·год. електроенергії, що виробляється). При цьому питомий викид твердих частинок знизився на 35-40%. Велике значення має і

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 26 |

вибір оптимального співвідношення між двома основними видами палива—вугіллям та природним газом [12].

Але сьогодні ТЕС України потребують значної модернізації шляхом реалізації цілого комплексу короткотермінових та довготермінових інвестиційних заходів. Одним із найбільш ефективних шляхів модернізації є запровадження нових комбінованих газопарових турбін, що забезпечують максимальний ККД і високу маневреність [8, 13-15]. Особливості спалювання палива в газопарових турбінах з підвищеною інтенсивністю процесів змішування і згорання дозволяють отримати більш низький рівень забруднення навколишнього середовища, ніж у інших теплових двигунах, практично за всіма шкідливими компонентами. Для України цей напрям, безумовно, є перспективним, оскільки національними виробниками (ОАО "Турбоатом", "Мотор-Січ" і НПП "Машпроект") виробляється газотурбінне устаткування, яке відповідає всі сучасним вимогам. Разом з тим на українських ТЕС, на жаль, не має в експлуатації ні однієї сучасної газової турбіни, а необхідність така існує. Відомо, що якби українські ТЕС були оснащені такими турбінами, то споживання газу в країні було б значно нижче і газ використовувався б більш ефективно, що сьогодні при зростанні цін на газ є дуже актуальним.

Коштів на великомасштабні реконструкції систем спалювання палива немає, інвестор без державної гарантії компенсації вкладених коштів не прийде. Досвід закордонної енергетики показує, що реконструкція генеруючого і газоочисного обладнання, яка вимагає менших капіталовкладень, дозволяє продовжити термін його роботи, підвищити його надійність і економічність, зменшити антропогенний тиск на навколишнє середовище. Аналіз ефективності очищення газових викидів від зважених частинок на різних золоочисних установках (табл. 1) показує, що найбільш ефективними є електрофільтр і рукавний фільтр, зокрема з уловлювання дрібнодисперсних частинок [16].

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 27 |

Ефективність очищення газових викидів від твердих частинок

| Пристрій | Розмір частинок, мкм | Ефективність очищення, % |
|---------------------|----------------------|--------------------------|
| Осаджувальна камера | 100 | 40-50 |
| Циклон | 30 | 50-60 |
| Мультициклон | 10-15 | 90-95 |
| Рукавний фільтр | 0,5 | до 99 |
| Скрубер | 0,5 | 75-85 |
| Електрофільтр | 0,1 | 95-99 |

Електростатичні фільтри (ЕСФ), які сьогодні є найбільш розповсюдженими пилоочисними апаратами на вітчизняних ТЕС, можуть забезпечувати досить високу ступень очищення газів тільки при певних умовах експлуатації [8, 17], а саме — низькій швидкості газового потоку, відносно крупних розмірів частинок пилу, оптимальному питомому опорі його, оптимальному режимі струшування електродів, відсутності вторинного виносу і т.д. Навіть незначні зміни одного з вище названих параметрів процесу призводить до зниження ефективності роботи фільтрів. Негативний вплив на ККД ЕСФ чинить також нерівномірність концентрації твердих частинок по перерізу фільтра на ТЕС. Реальний ККД існуючих ЕСФ на ТЕС України знаходиться в межах 90-98%, що з урахуванням реальної запиленості газів на вході пиловловлюючої установки не дозволяє забезпечити європейські стандарти [11].

В закордонній практиці для очищення газів, які викидаються ТЕС, широко застосовуються рукавні фільтри, що зумовлено високими техніко-економічними показниками їх роботи ($\eta = 99,9\%$) [18, 19]. В останні роки рукавні фільтри нового покоління нашли застосування і в Україні, зокрема в коксохімічній і в металургійній промисловості [20]. Тривалий час використання рукавних фільтрів в теплоенергетиці затримувалося відсутністю фільтрувальних тканин, які витримують високу температуру (від

150 до 280 °С), значну вологість і наявність у димових газах агресивних компонентів— оксидів сірки і азоту, хлористого водню та ін.

Перешкодою до впровадження в систему газопилоочистки на підприємствах енергетичної галузі було і те, що із-за високого вмісту смолистих речовин в димових газах при розпалюванні котлів мазутом ускладнювалася експлуатація технологічного обладнання ТЕС. Застосування рукавних фільтрів нового покоління дозволяє проводити очищення газів від дрібнодисперсної фракції леткої золи і від деяких хімічних компонентів, зокрема, від оксидів сірки [21]. Температурна стійкість сучасних тканин, що широко використовуються в рукавних фільтрах для очищення газів в теплоенергетиці більшості європейських країн, коливається в межах 100-280 °С. Спеціальна обробка тканин надає матеріалу і хімічну стійкість. Стійкість фільтрувальних елементів при правильно підібраних матеріалах зберігається до 5 років [3].

Основними факторами формування несприятливої екологічної ситуації в м. Черкаси є давня і висока освоєність території, соціально незадовільна структура виробництва, розвиток хімічної і машинобудівної галузей промисловості інтенсивний процес урбанізації, несприятливі природні умови регіону щодо розсіювання домішок [22]. В попередніх роботах [23, 24] було показано, що в комплексі антропогенних факторів, що сприяють надходженню важких металів до урболандшафтів м. Черкаси особливе місце за своєю значимістю та ступенем впливу на довкілля займає техногенне забруднення атмосфери викидами ТЕС (75% загальної кількості важких металів, що викидається від стаціонарних джерел, а за викидами Pb, Cu, та Zn частка ТЕС складає 85%).

Черкаська ТЕЦ розташована у південно-східній частині міста, у промисловій зоні, на території 68 га і виробляє електроенергію та тепло. На станції встановлено 14 котлів (9 силових та 5 водогрійних), об'єднаних у технологічні блоки. Всі ці котли підключені до однієї труби 180 м заввишки. Проектні електрична потужність 200 МВт і теплова потужність 1308

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 29 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Гкал/рік. Проект був розроблений в 60-70-ті роки ХХ століття. Перша черга була призначена для покриття теплових і електричних навантажень заводу штучного волокна (ЗШВ) и була запрограмована і побудована по традиційній схемі з використанням традиційного обладнання: чотири енергетичні котли ПК-19-2 і турбіни – конденсаційна і протигідравлічна. Були використані у якості зололовлювачів труби Вентурі зі скруберами. Котли переобладнані таким чином, що можуть працювати на природному газі, вугіллі і на мазуті за необхідністю.

Зараз котли ПК-19-2 працюють на природному газі.

Друга черга в проектному рішенні була задумана для реалізація задач не тільки тепло- і енергозабезпечення міста, але і збагачення леткої золи сполуками германію для наступного промислового вилучення їх із золи і переробкою в германій, що використовується в напівпровідниковій техніці. Для реалізації цієї мети була використана схема спалювання твердого палива в циклонних передтопках котлів БКЗ-220-100 ГЦ. Тонкодисперсна зола, що утворювалася, слугувала центрами конденсації парів германію. Високі швидкості димових газів, високі температури (1600-1800°C) в топкових циклонах призводили до утворення оксидів азоту на рівні 2600-3200 мг/нм³, оксидів вуглецю на рівні 300-400 мг/нм³ і твердих частинок на рівні 730-769 мг/нм³.

Промислова переробка золи з метою отримання германію не знайшла подальшого розвитку, а оскільки задач теплопостачання міста не зняли, то для підвищення надійності енергозабезпечення на котлах К-9 були демонтовані старі зололовлювачі, які вже не забезпечувалися ККД на рівні 93-97%, і змонтовані зололовлювачі мокрого типу – труби Вентурі, скрубера з верхнім підводом газів і з виходом очищених газів через центральну подовжену трубу. Ця конструкція виявилась ще менш надійною, так як спалювалось вугілля з вмістом сірки до 3,8-4,2%, а наявність топкових циклонів передбачала утворення складних комбінацій оксидів азоту і сірки, з яких в мокрих зололовлювачах утворювалася суміш кислот, що виводила з

| | | | | | | |
|-----|------|-----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 30 |
| Зм. | Арку | № док.ум. | Підпис | Дата | | |

строю скрубера і газопилоочисне обладнання вже через 3-4 місяця. В 90-х роках відмовилися від мокрого золовловлення и зупинились на сухих інерційних золовловлювачах типу БЦУ-М, які мають в середньому ККД – 82,6% (для великих фракцій ККД 95-97%, для тонкодисперсної золи ККД значно нижчі, для фракцій до 1 мкм – 50%). Оскільки зола вловлювалась на 85-90% рідким шлаковидаленням, а інші 15-10% — в золоуловлювачах з ККД 82,6%, то загальне вловлювання золи було на рівні 88-90%. Такий варіант золовловлення був прийнятий і затверджений остаточно і існує досі. Основний недолік цього типу золовловлювачів – низький ККД по тонкодисперсній фракції.

Золоуловлююча установка котлоагрегату БКЗ-220-100 ГЦ складається з чотирьох односекційних батарейних циклонів типу ЦБУ-М з горизонтальною установкою циклонних елементів (рис. 4). У кожній секції розташовано 144 паралельно включених циклонних елемента, об'єднаних в одному корпусі. Усього в золовловлюючій установці 576 циклонних елементів.

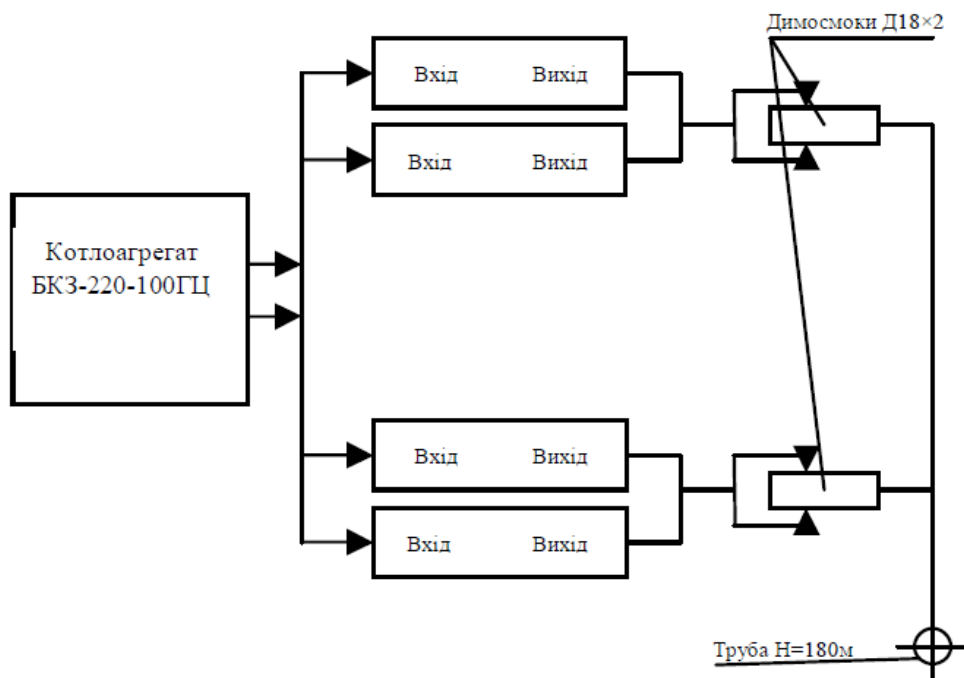


Рисунок 12— Схема включення золовловлювачів ЦБУ-М

Очищення газів у батарейному циклоні досягаються в результаті впливу на тверді частки сил інерції, що виникають при закручуванні газового потоку в циклонних елементах.

Ступінь очищення газів від золи в ЦБУ-М залежить від фракційного складу золи і продуктивності котла (рис. 13).

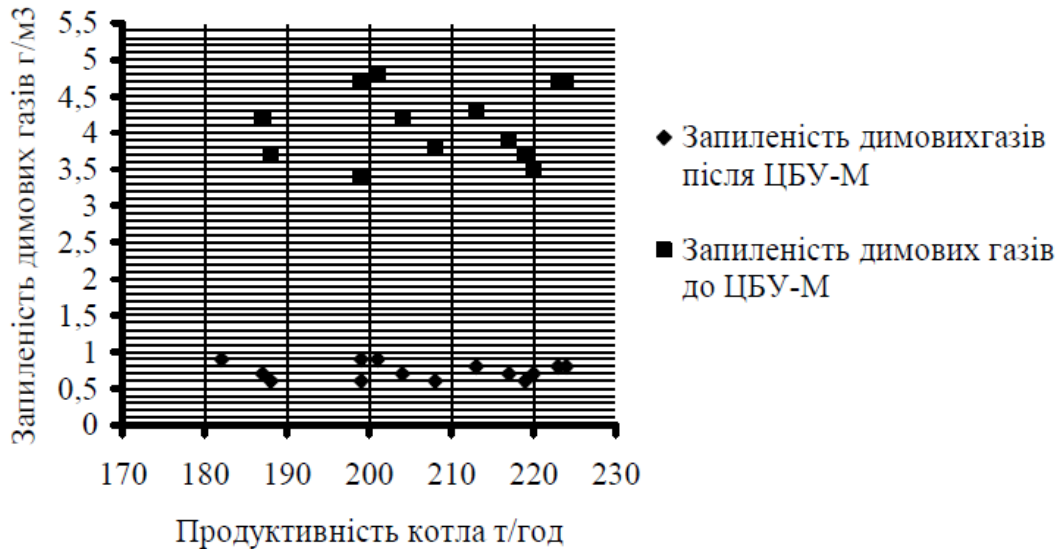


Рис. 13 Запиленість димових газів до і після очищення

Основними видами енергоносіїв для підприємства є природний газ (4 котли ПК-19-2 першої черги) та вугілля (5 котлів БКЗ-220-100 ГЦ другої черги), частка якого в останні роки значно зросла, а якість погіршилася, що призвело до збільшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу [25]. Перелік інгредієнтів, які надходять у атмосферу у складі викидів, включає 40 речовин. Основними забруднюючими речовинами є оксид вуглецю, оксиди сірки, азоту та пил. Джерелом твердих частинок є котли №5-9 БКЗ-220-100 ГЦ другої черги.

Для очищення димових газів є 15 установок. Основне газоочисне обладнання включає труби Вентурі та мультициклони. Характеристики установок для очищення викидів від пилу та газів наведено у таблиці 4.

Характеристики установок для очищення викидів від пилу та газів

| Джерело викидів | Установка очищення | Забруднююча речовина | Вхідна концентрація, мг/м ³ | Ефективність очищення, % | Вихідна концентрація, мг/м ³ |
|-----------------|---|--|--|--------------------------|---|
| 1/котел №1 | Труба Вентурі (2 установки) з краплеуловлювачем | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 13061 | 92 | 1026 |
| 1/ котел №2 | Труба Вентурі (2 установки) з краплеуловлювачем | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 12819 | 91 | 1113 |
| 1/ котел №3 | Труба Вентурі (2 установки) з краплеуловлювачем | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 12586 | 91 | 1093 |
| 1/ котел №4 | Труба Вентурі (2 установки) з краплеуловлювачем | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 12819 | 92 | 1007 |
| 2/ котел №5 | мультициклон ПБТ (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 12068 | 78 | 2586 |
| 2 | мультициклон БТУ-М (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 2586 | 76 | 632 |
| | | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 3147 | 76 | 769 |
| 2/ котел №6 | мультициклон ПБТ (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 14204 | 76 | 3378 |
| 2 | мультициклон БТУ-М (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 3288 | 78 | 750 |
| | | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 3378 | 78 | 730 |
| 2/ котел №7 | мультициклон ПБТ (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 13835 | 76 | 3235 |
| 2 | мультициклон БТУ-М (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 3235 | 77 | 750 |
| | | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 3148 | 77 | 730 |
| 2/ котел №8 | мультициклон ПБТ (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 13477 | 79 | 2778 |
| 2 | мультициклон БТУ-М (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 2778 | 78 | 611 |
| | | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 3380 | 78 | 744 |
| 2/ котел №9 | мультициклон ПБТ (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 12510 | 78 | 2703 |
| 2 | мультициклон БТУ-М (2 установки) | Пил вугільного концентрату | 2703 | 77 | 627 |
| | | Неорганічний пил, 20-70 % SiO ₂ | 3290 | 77 | 764 |

Існуюча на підприємстві ефективність очищення димових газів не забезпечує виконання закону про охорону атмосферного повітря. Фактичні рівні викидів пилу, оксидів вуглецю, сірки та азоту (таблиця 3) перевищують відповідні нормативні значення, визначені українським природоохоронним законодавством і директивами ЄС.

Концентрація забруднюючих речовин у викидах Черкаської ТЕЦ

Таблиця 5

| № п/п | Марка, тип установки спалювання | Вид палива | Найменування речовини | Концентрація забруднюючих речовин, мг/м ³ | Дата заміру |
|-------|---------------------------------|---------------|--|--|--------------------------|
| 1 | ПК-19-2, ст.№1 | Природний газ | Двоокис азоту Окис вуглецю | 327 70 | 14.03.2007 |
| 2 | ПК-19-2, ст.№2 | Природний газ | Двоокис азоту Окис вуглецю | 328 77 | 14.12.2006 02.02.2006 |
| 3 | ПК-19-2, ст.№3 | Природний газ | Двоокис азоту Окис вуглецю | 286 83 | 14.12.2006 02.02.2006 |
| 4 | ПК- 19-2, ст.№4 | Природний газ | Двоокис азоту Окис вуглецю | 280 78 | 17.10.2007 |
| 5 | БКЗ-220-100ГЦ, ст. №5 | Вугілля | Двоокис азоту Окис вуглецю Ангідрид сірчистий Тверді речовини | 1687,5 51,9 2500 1469 | 17.10.2007 |
| 6 | БКЗ-220-100ГЦ, ст. №6 | Вугілля | Двоокис азоту Окис вуглецю Ангідрид сірчистий Тверді речовини | У ремонті з 2005 р. | |
| 7 | БКЗ-220-100ГЦ, ст. №7 | Вугілля | Двоокис азоту Окис вуглецю Ангідрид сірчистий Тверді речовини | 1600 70 2214 1010 | 26.03.2007 |
| 8 | БКЗ-220-100ГЦ, ст. №8 | Вугілля | Двоокис азоту Окис вуглецю Ангідрид сірчистий Тверді речовини | 1653 58,7 2300 1729 | 15.06.2007 |
| 9 | БКЗ-220-100ГЦ, ст. №9 | Вугілля | Двоокис азоту Окис вуглецю Ангідрид сірчистий Тверді речовини | 2450 40 7342 970 | 26.10.2006 |

Аналіз роботи газоочисного обладнання показав, що вугільна летка зола з котлів ПК-19-2 №1-4 при їх роботі на вугіллі вловлюється зололовлювачами з двома трубами Вентурі на кожному котлоагрегаті, ефективність очищення яких 91-92%. Усі котли БКЗ-220-100 ГЦ, № 5-9 мають зололовлювачі мультициклони з ефективністю очищення 76-78%. Зважаючи на нинішній стан на підприємстві та необхідність зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, ТЕЦ потребує значної модернізації шляхом реалізації

цілого комплексу заходів, в першу чергу направлених на реконструкцію системи пилогазоочистки котлів БКЗ-220 для уловлювання дрібнодисперсної фракції леткої золи, що утворюється при спалюванні вугілля.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 35 |

2. Визначення та план скорочення викидів забруднювальних речовин

2.1. Визначення викидів забруднювальних речовин

2.1.1. Визначення викидів забруднювальних речовин за даними постійних вимірювань

Визначення викидів забруднювальних речовин від енергетичних установок здійснюється відповідно до вимог чинних нормативних документів України. У даній роботі для розрахунку валових та питомих викидів використано методику, регламентовану ГКД 34.02.305-2002 [4].

Застосування зазначеної методики забезпечує уніфікований підхід до оцінювання викидів та дозволяє коректно порівнювати розрахункові результати з установленими екологічними нормативами.

Під час проведення постійних вимірювань концентрацій забруднювальних речовин і поточних витрат димових газів, які надходять у атмосферне повітря від енергетичної установки, валовий викид (E_j), т, j -ї забруднювальної речовини за проміжок часу (P) визначається за формулою

$$E_j = 10^{-9} \sum_t^P c_j(t) V(t) \Delta t, \quad (1)$$

де P – проміжок часу звітності;

$c_j(t)$ – масова концентрація j -ї забруднювальної речовини в сухих димових газах, яка вимірюється в момент часу t , мг/м³;

$V(t)$ – витрата сухих димових газів, яка вимірюється в момент часу t , м³/с;

Δt – дискретність вимірювань, с.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 36 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Масова концентрація c_j , мг/м³, j -ї забруднюючої речовини в сухих димових газах, розраховується через об'ємну концентрацію за співвідношенням

$$c_j = c_{vj} \rho_j \quad (2)$$

де c_{vj} – об'ємна концентрація j -ї забруднювальної речовини в сухих димових газах, см³/м³;

ρ_j – густина j -ї забруднювальної речовини в умовах вимірювання її концентрації, кг/м³.

Густина забруднювальної речовини ρ_j , кг/м³, в умовах вимірювання концентрації розраховується за формулою

$$\rho_j = \rho_{j0} \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}, \quad (3)$$

де ρ_{j0} – густина j -ї забруднювальної речовини при нормальних умовах (тиску p_0 та температурі T_0), кг/м³;

p – тиск в умовах вимірювання концентрації, МПа;

T – температура в умовах вимірювання концентрації, К.

Під час проведення постійних вимірювань тільки масової концентрації забруднювальної речовини $c_j(t)$ поточна витрата димових газів $V(t)$ розраховується через обсяги витрат палив, які спалюються в енергетичній установці:

$$V(t) = \sum_i (v_{дг})_i b_i(t), \quad (4)$$

де $(v_{дг})_i$ – питомий об'єм сухих димових газів на робочу масу під час спалювання i -го палива при нормальних умовах, м³/кг;

$b_i(t)$ – витрата i -го палива в момент часу t , кг/с.

Питомий об'єм $v_{дг}$ сухих димових газів розраховується при стандартному вмісті кисню і нормальних умовах. Формула (1) для визначення валового викиду j -ї забруднювальної речовини приймає вигляд:

$$E_j = 10^{-9} \sum_i^P \left(c'_j(t) \sum_i (v_{дг})_i b_i(t) \right) \Delta t, \quad (5)$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 37 |

де E_j – валовий викид j -ї забруднювальної речовини за проміжок часу P , т;

$c'_j(t)$ – приведена масова концентрація j -ї забруднювальної речовини в сухих димових газах при стандартному вмісті кисню і нормальних умовах в момент часу t , мг/нм³;

$(v_{дг})_i$ – питомий об'єм сухих димових газів на робочу масу під час спалювання i -го палива при стандартному вмісті кисню і нормальних умовах, нм³/кг;

$b_i(t)$ – витрата i -го палива в момент часу t , кг/с;

Δt – дискретність вимірювань, с.

Приведену масову концентрацію $c'_j(t)$, мг/нм³, j -ї забруднювальної речовини в сухих димових газах при стандартному вмісті кисню та нормальних умовах в момент часу t можна отримати через значення вимірної масової концентрації j -ї забруднювальної речовини $c_j(t)$ за формулою

$$c'_j(t) = c_j(t) \frac{21 - \alpha}{21 - \alpha_0} = c_j(t) \frac{\alpha}{\alpha_0}, \quad (6)$$

де $c_j(t)$ – виміряна масова концентрація j -ї забруднювальної речовини в сухих димових газах при нормальних умовах в момент часу t , мг/нм³;

O_2 – вміст кисню в димових газах при вимірюванні концентрації, %;

α – коефіцієнт надлишку повітря при вимірюванні концентрації;

α_0 – коефіцієнт надлишку повітря при стандартному вмісті кисню в димових газах .

Формули розрахунку питомого об'єму сухих димових газів під час спалювання палива з урахуванням його механічного недопалу наведено в додатку А [4]. Для розрахунку питомого об'єму сухих димових газів у випадку використання газоподібного палива попередньо необхідно перерахувати об'ємні характеристики палива в масові. Формули перерахунку об'ємних характеристик газоподібного палива в масові наведено в додатку Б [4]. Усі розрахунки провадяться для робочої маси палива. Формули перерахунку характеристик палива з сухої беззольної маси на робочу або суху наведено в додатку В [4]. За

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 38 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

відсутності фактичних даних про елементний склад палива використовуються значення, наведені в додатку Г [4].

2.1.2. Визначення викидів забруднювальних речовин розрахунковими методами

Розрахункові методи визначення викидів забруднювальних речовин базуються на використанні показника емісії. Показник емісії характеризує масову кількість забруднювальної речовини, яка викидається енергетичною установкою в атмосферне повітря разом з димовими газами, віднесена до одиниці енергії, що виділяється під час згоряння палива. У даній роботі розрахункові методи застосовуються у випадках відсутності або недостатньої репрезентативності даних постійних вимірювань, що відповідає вимогам чинних нормативних документів.

Показник емісії залежить від багатьох чинників, зокрема від виду палива, технології його спалювання, конструктивних особливостей енергетичної установки та наявності газоочисного обладнання. Існують два основні показники емісії — узагальнений та специфічний.

Узагальнений показник емісії забруднювальної речовини є середньою питомою величиною викиду для певної категорії енергетичних установок, певної технології спалювання палива та певного виду палива з урахуванням заходів щодо зниження викидів. Він не враховує індивідуальних особливостей хімічного складу палива.

Специфічний показник емісії є питомою величиною викиду, яка визначається для конкретної енергетичної установки з урахуванням фактичного складу палива, режимних параметрів процесу спалювання та ефективності застосованих заходів з очищення димових газів.

За наявності обох показників емісії у розрахунках доцільно використовувати специфічний показник, як такий, що забезпечує вищу точність оцінювання викидів.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 39 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Валовий викид j -ї забруднювальної речовини E_j , т, що надходить у атмосферу з димовими газами енергетичної установки за проміжок часу P , визначається як сума валових викидів цієї речовини під час спалювання різних видів палива, у тому числі під час їх одночасного спільного спалювання:

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i (Q_i^r)_i, \quad (7)$$

де E_{ji} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{ji} – показник емісії j -ї забруднювальної речовини для i -го палива, г/ГДж;

B_i – витрата i -го палива за проміжок часу P , т;

$(Q_i^r)_i$ – нижча робоча теплота згоряння i -го палива, МДж/кг.

Показники емісії забруднювальних речовин визначаються за формулами, наведеними в розділах 5.1 — 5.8.

Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок

Показник емісії речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (пилу) є спецефічним і визначається за формулою

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{Q_i^r} a_{\text{вин}} \frac{A^r}{100 - \Gamma_{\text{вин}}} (1 - \eta_{\text{зв}}) + k_{\text{ТВС}}, \quad (8)$$

або

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{Q_i^r} \left(a_{\text{вин}} \frac{A^r}{100} + \frac{q_4}{100} \cdot \frac{Q_i^r}{Q_C} \right) (1 - \eta_{\text{зв}}) + k_{\text{ТВС}}, \quad (9)$$

де $k_{\text{ТВ}}$ – показник емісії твердих частинок, г/ГДж;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

$a_{\text{вин}}$ – частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

Q_C – теплота згоряння вуглецю до CO_2 , яка дорівнює 32,68 МДж/кг;

q_4 – втрати тепла, пов'язані з механічним недопалом палива, %;

$\eta_{\text{зв}}$ – ефективність очищення димових газів від твердих частинок;

$\Gamma_{\text{вин}}$ – масовий вміст горючих речовин у викидах твердих частинок, %;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 40 |

$k_{\text{твс}}$ – показник емісії твердих продуктів взаємодії сорбенту та оксидів сірки і твердих частинок сорбенту, г/ГДж.

Вміст золи A^r в паливі та горючих у викиді твердих частинок $\Gamma_{\text{вин}}$ визначаються при проведенні технічного аналізу за ГОСТ 11022-95 (ISO 1171-81) палива і леткої золи, яка виходить з енергетичної установки, відповідно.

Зола палива виходить з енергетичної установки у вигляді леткої золи (виносу) та або донної золи (шлаку). Частка золи, яка виноситься з енергетичної установки у вигляді леткої золи, $a_{\text{вин}}$ залежить від технології спалювання палива і визначається за даними останніх випробувань енергетичної установки, а за їх відсутності – за паспортними даними. За відсутності таких даних значення $a_{\text{вин}}$ приймаються згідно з таблицею Д.1 (додаток Д) [4].

Значення ефективності очищення димових газів від твердих частинок $\eta_{\text{зв}}$ визначається за результатами останніх випробувань золоуловлювальної установки або за її паспортними даними. Ефективність золоуловлювальної установки визначається як різниця між одиницею та відношенням масових концентрацій твердих частинок після і до золоуловлювальної установки.

При використанні сорбенту для зв'язування оксидів сірки в топці котла (наприклад, за технологіями спалювання палива в киплячому шарі) чи при застосуванні технологій сухого або напівсухого зв'язування сірки утворюються тверді частинки сульфату та сульфіту і невикористаного сорбенту. Показник емісії твердих частинок невикористаного в енергетичній установці сорбенту та утворених сульфатів і сульфітів $k_{\text{твс}}$, г/ГДж, розраховується за формулою

$$k_{\text{твс}} = \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \frac{S^r}{100} \left[\eta_l \frac{\mu_{\text{прод}}}{\mu_s} + (m - \eta_l) \frac{\mu_{\text{сорб}}}{\mu_s} \right] a_{\text{вин}} (1 - \eta_{\text{зв}}), \quad (10)$$

де Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

$a_{\text{вин}}$ – частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

$\mu_{\text{прод}}$ – молекулярна маса твердого продукту взаємодії сорбенту та оксидів сірки, кг/кмоль;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 41 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

$\mu_{\text{сорб}}$ – молекулярна маса сорбенту, кг/кмоль;

μ_S – молекулярна маса сірки, яка дорівнює 32 кг/кмоль;

m – мольне відношення активного хімічного елементу сорбенту та сірки (таблиця Д.2 додатка Д) [4];

η_I – ефективність зв'язування сірки сорбентом у топці або при застосуванні сухих та напівсухих методів десульфуризації димових газів (таблиці Д.2 і Д.3 додатка Д) [4];

$\eta_{\text{зу}}$ – ефективність очистки димових газів від твердих частинок.

Діоксид сірки SO₂

Показник емісії k_{SO_2} , г/ГДж, оксидів сірки SO₂ та SO₃, у перерахунку на діоксид сірки SO₂ визначається за формулою:

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \quad (11)$$

де Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

S^r – вміст сірки в паливі на робочу масу за проміжок часу P , %;

η_I – ефективність зв'язування сірки золою або сорбентом у енергетичній установці;

η_{II} – ефективність очистки димових газів від оксидів сірки;

β – коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Масовий вміст сірки в робочій масі потрібно визначати під час технічного аналізу палива відповідно до ГОСТ 27313-95 (ISO 1170-77).

Усереднені значення вмісту сірки для різних видів і марок палива наведено в додатку Г [4]. Ці значення беруться у випадку відсутності достовірних даних технічного аналізу.

Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у енергетичній установці η_I залежить від технології спалювання та хімічного складу палива, яке спалюється, і типу сорбенту. Під час спалювання твердого палива, до мінеральної складової якого входять сполуки лужних та лужноземельних металів,

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 42 |

відбувається часткове зв'язування сірки з утворенням сульфатів або сульфідів. Під час спалювання твердого палива за технологіями киплячого шару подача сорбенту разом з паливом забезпечує ефективне зв'язування сірки в топці енергетичної установки. За відсутності даних для енергетичної установки про ефективність зв'язування сірки в топковому просторі значення η_I для різних технологій спалювання палива приймаються згідно з таблицею Д.2 (додаток Д) [4].

Димові гази можуть бути очищені від оксидів сірки в сіркоочисних установках шляхом застосування технологій десульфуризації димових газів з різною ефективністю очищення η_{II} . Коефіцієнт роботи сіркоочисної установки β визначається як відношення часу роботи сіркоочисної установки до часу роботи енергетичної установки. Для розрахунків необхідно використовувати значення η_{II} , одержане під час останнього випробування сіркоочисної установки, і значення β , одержане при аналізі даних про роботу очисної та енергетичної установок у цілому. За відсутності таких даних значення ефективності сіркоочищення димових газів та коефіцієнта роботи сіркоочисної установки за різними технологіями десульфуризації приймаються згідно з таблицею Д.3 (додаток Д) [4].

До установок десульфуризації димових газів відносяться і деякі види золоуловлювальних установок. Для електростатичних фільтрів та циклонів ефективність уловлення оксидів сірки η_{II} є незначною і дорівнює нулю. Для мокрих золоуловлювальних установок (мокрих скрубєрів типу МС та МВ) величина η_{II} залежить від загальної лужності води на зрошення та від вмісту сірки в паливі S' . Приведений вміст сірки визначається як відношення масового вмісту сірки на робочу масу палива до нижчої робочої теплоти згоряння палива ($S' = S / Q_i'$). Дані про ефективність уловлення оксидів сірки в мокрих скрубєрах наведено в таблиці Д.4 (додаток Д) [4].

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 43 |

Оксиди азоту NO_x

Під час спалювання органічного палива утворюються оксиди азоту NO_x (оксид азоту NO та діоксид азоту NO₂), викиди яких визначаються в перерахунку на NO₂.

Показник емісії оксидів азоту k_{NO_x} , г/ГДж, з урахуванням заходів скорочення викиду розраховується як

$$k_{NO_x} = (k_{NO_x})_0 f_n (1 - \eta_I) (1 - \eta_{II} \beta), \quad (12)$$

де $(k_{NO_x})_0$ – показник емісії оксидів азоту без урахування заходів скорочення викиду, г/ГДж;

f_n – ступінь зменшення викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні;

η_I – ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів скорочення викиду;

η_{II} – ефективність вторинних заходів (азотоочисної установки);

β – коефіцієнт роботи азотоочисної установки.

Для конкретної енергетичної установки специфічний показник емісії оксидів азоту може бути визначено на основі результатів випробувань енергетичної установки, документально підтверджених відповідними актами. Формулу перерахунку значення вимірної концентрації забруднювальної речовини в показник емісії приведено в додатку А [4].

Значення узагальненого показника емісії оксидів азоту під час спалювання органічного палива за різними технологіями без урахування заходів щодо скорочення викиду NO_x визначаються згідно з таблицею Д.5 (додаток Д) [4].

Під час роботи енергетичної установки на низькому навантаженні зменшується температура процесу горіння палива, завдяки чому скорочується викид оксидів азоту. Ступінь зменшення викиду NO_x при цьому визначається за емпіричною формулою

$$f_n = (Q_\phi / Q_n)^z, \quad (13)$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 44 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

де f_n – ступінь зменшення викиду оксидів азоту під час роботи на низькому навантаженні;

Q_ϕ – фактична теплова потужність енергетичної установки, МВт;

Q_n – номінальна теплова потужність енергетичної установки, МВт;

z – емпіричний коефіцієнт, який залежить від виду енергетичної установки, її потужності, типу палива тощо.

Якщо відома тільки продуктивність парового котла (D), його теплова потужність (Q) визначається згідно з додатком Ж [4]. Емпіричний коефіцієнт (z) визначається під час випробувань енергетичної установки. За їх відсутності значення z береться з таблиці Д.6 (додаток Д).

Первинні (режимно-технологічні) заходи скорочення викидів оксидів азоту спрямовані на зменшення їх утворення в топці або камері згоряння енергетичної установки. До таких заходів належать застосування малотоксичних пальників, ступенева подача повітря та палива, рециркуляція димових газів тощо. Значення ефективності первинних заходів η_I визначаються за результатами випробувань і затверджуються відповідними актами. Орієнтовні значення η_I наведені в таблиці Д.7 (додаток Д) [4].

У разі неможливості досягнення нормативних концентрацій оксидів азоту первинними заходами застосовуються вторинні методи очищення — азотоочисні установки. Значення ефективності η_{II} та коефіцієнта роботи η_{II} визначаються під час випробувань, або приймаються за таблицею Д.8 (додаток Д) [4].

Важкі метали

Викид важких металів та їх сполук пов'язано з наявністю в мінеральній частині палива сполук важких металів. До важких металів, сполуки яких є найбільш шкідливими для навколишнього природнього середовища, належать: арсен (As), кадмій (Cd), хром (Cr), мідь (Cu), ртуть (Hg), нікель (Ni), свинець (Pb), селен (Se), цинк (Zn).

Під час спалювання мазуту або важкого дизельного палива до важких металів цієї групи віднесено також ванадій (V) та його сполуки.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 45 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

У частинках леткої золи більшість цих елементів зустрічається у вигляді оксидів і хлоридів. У газоподібних викидах можлива наявність ртуті, селену та арсену, які частково випаровуються з палива.

Спалювання вугілля

Під час спалювання вугілля показник емісії важкого металу $k_{в.м}$, г/ГДж, є специфічним і визначається за формулою

$$k_{в.м} = \frac{c_{в.м}}{Q_i^r} [a_{вин} f_{зб} (1 - \eta_{зу}) (1 - f_{г}) + f_{г} (1 - \eta_{гзу})], \quad (14)$$

де $c_{в.м}$ – масовий вміст важкого металу у паливі, мг/кг;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

$a_{вин}$ – частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

$f_{зб}$ – коефіцієнт збагачення важкого металу;

$\eta_{зу}$ – ефективність золоуловлювальної установки;

$f_{г}$ – частка важкого металу, яка виходить у газоподібній формі;

$\eta_{гзу}$ – ефективність уловлення газоподібної фракції важкого металу в золоуловлювальній установці.

Масовий вміст важкого металу у паливі визначається за результатами елементного аналізу палива. За відсутності таких даних орієнтовні значення приймаються згідно з таблицею Г.2 (додаток Г) [4].

Частка золи $a_{вин}$, яка виноситься з енергетичної установки у вигляді леткої золи, залежить від технології спалювання палива та визначається за додатком Д (таблиця Д.1 додатка Д) [4].

За відсутності можливості вимірювання вмісту важких металів у паливі орієнтовні значення $c_{в.м}$ визначають згідно з таблицею Г.2 ([додаток Г](#)) [4].

Коефіцієнт збагачення $f_{зб}$ характеризує підвищення вмісту важкого металу у дрібнодисперсній фракції леткої золи. Вміст важких металів різний для різних фракцій (розмірів) золи : у дрібній фракції золи вміст металів вищий, ніж у крупній фракції. Але оскільки в золоуловлювальній установці найбільш ефективно уловлюється крупна фракція, то в атмосферне повітря викидається

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 46 |

дрібна фракція, в якій вміст важких металів більший. Діапазон значень та рекомендовані величини f_{36} наведено в таблиці Д.9 (додаток Д) [4]. Це орієнтовні значення і їх використовують у випадках, коли немає більш точних даних для конкретної марки палива, що горить в ТПЕУ.

Частка важкого металу, яка виходить у газоподібній формі f_g , залежить від фізико-хімічних властивостей металу. Орієнтовні значення f_g наведені в таблиці Д.10 (додаток Д) [4].

Встановлення певного типу електростатичного фільтра, рукавного фільтра, мокрого скрубера чи батарейного циклона впливають на ефективність уловлювання твердих частинок та оцінюються значенням коефіцієнта η_{zy} .

Ефективність уловлювання газоподібної фракції важких металів $\eta_{гзу}$ залежить від типу золоуловлювальної установки та наявності інших систем очищення. Значення $\eta_{гзу}$ для електрофільтрів наведені в таблиці Д.11 (додаток Д) [4].

Спалювання мазуту

Під час спалювання мазуту в енергетичній установці утворюються сполуки важких металів, які є складовими мазутної золи. Основною складовою мазутної золи є сполуки ванадію, тому кількість його викиду прийнята як контрольний параметр шкідливої дії мазутної золи на навколишнє середовище.

Показник емісії мазутної золи k_v , г/ГДж, у перерахунку на ванадій є специфічним і розраховується за формулою:

$$k_v = \frac{c_v}{Q'_i} (1 - \eta_{oc}) (1 - \eta_{zy(v)}), \quad (15)$$

де Q'_i – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;

c_v – масовий вміст ванадію в паливі, мг/кг;

η_{oc} – частка ванадію, який осідає з твердими частинками на поверхнях нагріву котла;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 47 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

$\eta_{zy(V)}$ – ефективність уловлювання ванадію золоуловлювальною установкою.

Масовий вміст ванадію у мазуті визначається за результатами хімічного аналізу або розраховується за апроксимаційною формулою:

$$c_v = 2222A^r, \quad (16)$$

де A^r – масовий вміст золи в мазуті на робочу масу, %.

Масовий вміст золи в мазуті A^r визначається за даними технічного аналізу палива.

Під час спільного спалювання твердого палива та мазуту в пиловугільному котлі ефективність очищення димових газів від мазутної золи (у перерахунку на ванадій) визначається за емпіричною формулою

$$\eta_{zy(V)} = 1 - \frac{1 - \eta_{zy}}{f_v}, \quad (17)$$

де η_{zy} – ефективність очищення димових газів від твердих частинок,

f_v – емпіричний коефіцієнт, який враховує ефект “збагачення” ванадієм золи, яка виходить після золоуловлювальної установки, і залежить від типу установки.

Значення коефіцієнта f_v для різних типів золоуловлювальних установок наведено в таблиці Д.13 (додаток Д) [4].

Ефективність очищення димових газів від мазутної золи (у перерахунку на ванадій) $\eta_{zy(V)}$ у газомазутних котлах із батарейними циклонами, які спеціально застосовуються для уловлювання мазутної золи, визначається за емпіричною формулою (Д.1), наведеною в додатку Д [4].

Для розрахунку показника емісії п’ятиоксиду ванадію V_2O_5 , г/ГДж, як забруднювальної речовини, показник емісії мазутної золи в перерахунку на ванадій необхідно помножити на відношення молекулярних мас п’ятиоксиду ванадію та ванадію:

$$k_{V_2O_5} = k_v \frac{\mu_{V_2O_5}}{2\mu_v} = k_v \frac{182}{2 \cdot 51} \cong 1,8k_v, \quad (18)$$

де k_v – показник емісії мазутної золи в перерахунку на ванадій;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 48 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

$\mu_{\text{V}_2\text{O}_5}$ – молекулярна маса п'ятиоксиду ванадію, яка дорівнює 182 кг/кмоль;

μ_{V} – молекулярна маса ванадію, яка дорівнює 51 кг/кмоль.

Спалювання природного газу

При спалюванні природного газу в енергетичних установках утворення забруднювальних речовин у твердому стані є незначним, що зумовлено практично повною відсутністю зольних компонентів у складі палива. Разом з тим у процесі спалювання природного газу можливе утворення газоподібних забруднювальних речовин, зокрема оксидів азоту, оксиду вуглецю, діоксиду вуглецю, а також у незначних кількостях ртуті та її сполук.

У межах даної роботи оцінювання викидів при спалюванні природного газу здійснюється з використанням узагальнених показників емісії, що відповідає рекомендаціям нормативних документів за відсутності результатів прямих вимірювань.

Показник емісії ртуті під час спалювання природного газу є узагальненим і визначається за формулою:

$$k_{\text{Hg}} = (k_{\text{Hg}})_0 (1 - \eta_{\text{згу}}), \quad (19)$$

де $(k_{\text{Hg}})_0$ – показник емісії ртуті без урахування очищення димових газів, г/ГДж;

$\eta_{\text{згу}}$ – ефективність уловлювання ртуті газоочисною установкою

Значення $(k_{\text{Hg}})_0$ під час спалювання природного газу наведено в таблиці Д.14 (додаток Д) [4].

Ефективність уловлювання газоподібної ртуті $\eta_{\text{згу}}$ залежить від типу газоочисного обладнання та визначається за результатами випробувань або за табличними даними.

Оксид вуглецю CO

Утворення оксиду вуглецю CO є наслідком неповного згоряння вуглецю органічного палива. При зниженні навантаження енергетичної установки концентрація CO в димових газах, як правило, зростає.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 49 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Основним методом визначення викидів оксиду вуглецю є вимірювання його концентрації у відхідних газах. За відсутності постійних вимірювань валовий викид оксиду вуглецю визначається за формулою (7).

Для конкретної енергетичної установки специфічний показник емісії оксиду вуглецю може бути визначений на основі результатів випробувань установки, документально підтверджених відповідними актами. Формула перерахунку виміряної концентрації CO в показник емісії наведена в додатку А [4].

Значення узагальненого показника емісії оксиду вуглецю залежно від виду палива, потужності енергетичної установки та технології спалювання наведені в таблиці Е.1 (додаток Е) [4].

Діоксид вуглецю CO₂

Діоксид вуглецю CO₂ належить до парникових газів і є основним газоподібним продуктом окислення вуглецю органічного палива. Обсяг викидів CO₂ безпосередньо залежить від вмісту вуглецю в паливі та ступеня його окислення в процесі спалювання.

Показник емісії діоксиду вуглецю k_{CO_2} , г/ГДж, визначається за формулою:

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \varepsilon_c = 3,67 k_c \varepsilon_c, \quad (20)$$

де C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

ε_c – ступінь окислення вуглецю палива

Специфічний показник емісії вуглецю k_c , г/ГДж, визначається як:

$$k_c = \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r}, \quad (21)$$

де

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, Мдж/кг.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 50 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

За відсутності даних про елементний склад палива та його теплоту згоряння допускається використання узагальнених показників емісії вуглецю, наведених у таблиці Е.2 (додаток Е) [4].

При розрахунках викидів CO_2 вважається, що весь вуглець палива, який згорів, у підсумку перетворюється на діоксид вуглецю, оскільки монооксид вуглецю в атмосферних умовах швидко окислюється до CO_2 .

Оксид діазоту N_2O

Оксид діазоту N_2O також належить до парникових газів. За відсутності постійних вимірювань концентрації N_2O валовий викид визначається за формулою (7).

Значення узагальненого показника емісії N_2O залежно від виду палива, потужності енергетичної установки та технології спалювання наведено в таблиці Е.3 (додаток Е) [4].

Метан CH_4

Метан CH_4 належить до парникових газів. Його утворення при спалюванні органічного палива є незначним і пов'язане з неповним згоранням палива. Зі збільшенням температури процесу горіння та потужності енергетичної установки викиди метану зменшуються.

За відсутності прямих вимірювань валовий викид метану визначається за формулою (7). Узагальнені показники емісії метану для різних видів палива наведено в таблиці Е.4 (додаток Е) [4].

2.2. Технологічні нормативи допустимих викидів для теплосилових установок номінальною тепловою потужністю до 50 МВт

Для стаціонарних джерел забруднення атмосферного повітря в Україні нормативи граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин визначаються наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 51 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

від 27.06.2006 № 309 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел».

Технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних (теплосилових) установок номінальною тепловою потужністю понад 50 МВт регламентуються наказом Мінприроди України від 22.10.2008 № 541.

Для спалювальних установок середньої потужності спеціалізовані нормативи обмеженої дії встановлені наказом Мінприроди України від 13.10.2009 № 540, який регламентує рівні викидів забруднюючих речовин, що утворюються під час спалювання лушпиння соняшнику.

Таким чином, національна нормативна база визначає допустимі рівні викидів забруднюючих речовин залежно від потужності теплосилових установок, виду палива та застосованих технологій очищення димових газів.

Окрім національних нормативних документів, при оцінюванні допустимих рівнів викидів забруднюючих речовин для теплосилових установок номінальною тепловою потужністю від 1 до 50 МВт враховуються положення Директиви (EU) 2015/2193 від 25.11.2015 про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин в атмосферне повітря від середніх спалювальних установок.

Зазначена директива встановлює граничні значення викидів діоксиду сірки, оксидів азоту та пилу для котлів, газових турбін і двигунів внутрішнього згоряння, а також визначає вимоги щодо моніторингу викидів оксиду вуглецю.

Вимоги Директиви (EU) 2015/2193 використовуються як орієнтир при формуванні перспективних технологічних нормативів допустимих викидів для теплосилових установок в Україні та гармонізації національного законодавства з правом Європейського Союзу. .

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 52 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

У межах даної роботи зазначені нормативні документи розглядаються як базова регуляторна основа для оцінювання допустимих рівнів викидів від теплосилових установок невеликої та середньої потужності.

Загальні положення щодо технологічних нормативів

Технологічний норматив допустимого викиду забруднюючої речовини визначається як гранична масова концентрація цієї речовини у сухих відхідних газах, приведена до нормальних умов (температура 0 °С, тиск 101,32 кПа) та встановленого стандартного вмісту кисню.

Технологічні нормативи вимірюються в міліграмах на кубічний метр сухих димових газів (мг/нм³) і встановлюються для таких основних забруднюючих речовин:

- речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (пил);
- діоксид сірки SO₂;
- оксиди азоту NO_x (у перерахунку на NO₂);
- оксид вуглецю CO.

Приведення концентрацій до стандартного вмісту кисню є обов'язковою умовою коректного порівняння фактичних значень викидів з нормативними показниками.

Технологічні нормативи для теплосилових установок до 50 МВт

Технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин для теплосилових установок номінальною тепловою потужністю до 50 МВт встановлюються залежно від виду палива, типу енергетичної установки, технології спалювання та ефективності газоочисного обладнання.

Базові нормативи гранично-допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел визначаються відповідно до наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309. Вимоги

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 53 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

цього наказу мають загальний характер і застосовуються до всіх стаціонарних джерел забруднення атмосферного повітря незалежно від їх галузевої належності.

Граничні значення концентрацій основних забруднюючих речовин, встановлені наказом № 309, наведені у таблиці 5, яка відображає загальні нормативи допустимих викидів для стаціонарних джерел.

Таблиця 5

| Забруднююча речовина | Масова витрата, г/год | Вихідна концентрація, мг/м³ |
|-------------------------------------|------------------------------|---|
| Пил | > 500 | 50 |
| | <= 500 | 150 |
| Діоксид сірки SO₂ | >= 5000 | 500 |
| Оксиди азоту NO_x | >= 5000 | 500 |
| Оксид вуглецю CO | >= 5000 | 250 |

Спеціалізовані нормативи для котельних установок на біомасі

Для окремих категорій теплосилових установок застосовуються спеціалізовані технологічні нормативи. Зокрема, технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин для котельних установок, що працюють на лущинні соняшнику, встановлені наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 13.10.2009 № 540.

Зазначені нормативи визначають граничні концентрації забруднюючих речовин у сухих відхідних газах, приведених до нормальних умов (температура 0

°С, тиск 101,32 кПа) та стандартного вмісту кисню 11 %, що є характерним для спалювання біомаси.

Найбільш характерним видом забруднення для котельних установок, що працюють на лушпинні соняшнику, є викиди речовин у вигляді суспендованих твердих частинок (пилу). Технологічні нормативи допустимих викидів пилу залежать від типу пилогазоочисного обладнання та номінальної теплової потужності установки.

Граничні значення концентрацій пилу для різних умов експлуатації та типів очищення димових газів наведені у таблиці 6.

ВИКИДИ РЕЧОВИН У ВИГЛЯДІ СУСПЕНДОВАНИХ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК, НЕДИФЕРЕНЦІЙОВАНИХ ЗА СКЛАДОМ

Таблиця 6

| Тип нормативу | Вид палива | Тип пиловловлювача або номінальна теплова потужність P, МВт | Значення нормативу, мг/м ³ |
|---------------|--------------------|---|---------------------------------------|
| Поточний | Лушпиння соняшнику | Електрофільтр | 100 |
| Поточний | Лушпиння соняшнику | Циклон | 600 |
| Перспективний | Лушпиння соняшнику | $5 \leq P < 50$ | 50 |
| Перспективний | Лушпиння соняшнику | $P < 5$ | 100 |

Для поточних нормативів враховуються електрофільтри та циклони, тоді як перспективні нормативи встановлюють більш жорсткі вимоги залежно від теплової потужності котельної установки.

Технологічні нормативи допустимих викидів діоксиду сірки SO₂ та оксидів азоту NO_x (у перерахунку на NO₂) для котелень, що працюють на лушпинні

соняшнику, визначаються відповідно до наказу № 540. Граничні значення концентрацій SO₂ та NO_x для поточних і перспективних нормативів наведені у таблиці 7.

ВИКИДИ ДІОКСИДУ СІРКИ

Таблиця 7

| Тип нормативу | Вид палива | Значення нормативу, мг/м ³ | |
|---------------|--------------------|---------------------------------------|--|
| | | ДІОКСИДУ СІРКИ | ОКСИДІВ АЗОТУ в перерахунку на діоксид азоту |
| Поточний | Лушпиння соняшнику | 250 | 300 |
| Перспективний | Лушпиння соняшнику | 250 | 300 |

Ці нормативи враховують специфіку хімічного складу біопалива та особливості процесу його спалювання.

Нормування викидів оксиду вуглецю CO для котельних установок на лушпинні соняшнику залежить від способу спалювання палива. Для різних технологій спалювання встановлені різні граничні значення концентрацій оксиду вуглецю.

Відповідні нормативи для вихрового та шарового способів спалювання, а також перспективні значення наведені у таблиці 8.

ВИКИДИ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ

Таблиця 8

| Тип нормативу | Вид палива | Спосіб спалювання | Значення нормативу, мг/м ³ |
|---------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Поточний | Лушпиння соняшнику | Вихрове спалювання | 2250 |
| Поточний | Лушпиння соняшнику | Шарове спалювання | 750 |
| Перспективний | Лушпиння соняшнику | | 250 |

Узагальнена схема технологічних нормативів допустимих викидів для котельних установок, що працюють на лушпинні соняшнику, з урахуванням виду забруднюючих речовин, способу спалювання та типу газоочисного обладнання наведена на рисунку 2.1.

Технологічні нормативи викидів для котельні на лушпинні соняшнику

Наказ Мінприроди України № 540 від 13.10.2009

Потужність: до 50 МВт

Нормальні умови: 0 °С, 101,32 кПа

Стандартний вміст O₂ : 11 %



Рисунок 2.1 — Технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин для котельних установок на лушпинні соняшнику (за наказом Мінприроди України № 540)

Умови застосування технологічних нормативів

Технологічні нормативи допустимих викидів застосовуються за таких умов:

- температура приведення — 0 °С;
- тиск — 101,32 кПа;
- стандартний вміст кисню:
 - 6 % — для твердого палива;
 - 3 % — для рідкого та газоподібного палива;
 - 11 % — для спалювання лушпиння соняшнику;
 - 15 % — для двигунів і газових турбін.

Такий підхід забезпечує коректне порівняння фактичних і нормативних концентрацій та створює умови для поетапного скорочення викидів забруднюючих речовин.

Виділення Директиви 2015/2193/ЄС обумовлене її системним і превентивним характером, спрямованим на поетапне скорочення викидів забруднюючих речовин від найбільш поширеного класу теплосилових установок. Національне законодавство України, хоча й містить детальні галузеві нормативи, має більш фрагментований характер і поступово адаптується до європейських підходів, що зумовлює необхідність урахування вимог Директиви 2015/2193/ЄС при формуванні перспективних технологічних нормативів.

Директива 2015/2193/ЄС від 25.11.2015 про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин в атмосферне повітря від середніх спалювальних установок займає особливе місце в системі екологічного регулювання, оскільки вона вперше на рівні Європейського Союзу комплексно охопила середні спалювальні установки номінальною тепловою потужністю від 1 до 50 МВт.

Саме цей діапазон потужностей є найбільш поширеним для промислових і комунальних котелень, у тому числі біопаливних, що пояснює підвищену увагу до зазначеної директиви при аналізі екологічних вимог до теплосилових установок.

Слід зазначити, що Директива (EU) 2015/2193 від 25.11.2015 не встановлює жорстких граничних значень для викидів CO, але визначає вимоги щодо їх моніторингу, що враховується при формуванні національних нормативів.

З метою оцінювання ступеня гармонізації національної системи нормування викидів із європейськими підходами доцільно порівняти положення Директиви 2015/2193/ЄС та чинного законодавства України (табл. 9).

Порівняння підходів Директиви 2015/2193/ЄС та екологічного законодавства України

Таблиця 9

| Критерій порівняння | Директива 2015/2193/ЄС | Законодавство України |
|----------------------|---|--|
| Об'єкт регулювання | Середні спалювальні установки (1–50 МВт) | Усі стаціонарні джерела |
| Основний підхід | Єдині граничні значення викидів (ELVs) | Гранично-допустимі викиди (ГДВ) |
| Диференціація вимог | За потужністю, видом палива, типом установки | За галузевими нормативами та окремими наказами |
| Забруднюючі речовини | SO ₂ , NO _x , пил; CO — контроль і моніторинг | SO ₂ , NO _x , пил, CO (частково) |

| Критерій порівняння | Директива 2015/2193/ЄС | Законодавство України |
|----------------------|--|--|
| Оксид вуглецю (CO) | Переважно вимоги до моніторингу | Встановлюються граничні концентрації |
| Характер вимог | Поетапне посилення, орієнтація на НДТМ (BAT) | Переважно фіксовані нормативи |
| Терміни впровадження | Чітко визначені перехідні періоди | Залежать від національних рішень |
| Ступінь уніфікації | Єдина система для всіх країн ЄС | Фрагментована система нормативів |
| Орієнтація | Превентивне скорочення викидів | Контроль дотримання допустимих значень |

Для теплосилових установок номінальною тепловою потужністю менше 1 МВт спеціальні технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин не встановлюються. Такий підхід зумовлений незначним внеском цих установок у загальне забруднення атмосферного повітря та значною різноманітністю їх конструктивних і режимних характеристик.

Викиди забруднюючих речовин від теплосилових установок потужністю до 1 МВт повинні відповідати вимогам дотримання граничнодопустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин у приземному шарі повітря на межі житлової забудови, що забезпечує захист населення від шкідливого впливу викидів.

Розроблення та впровадження поточних технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин для теплосилових установок, зокрема в діапазоні потужностей від 1 до 50 МВт, пов'язане з низкою об'єктивних труднощів.

По-перше, велика кількість теплосилових установок середньої потужності, що експлуатуються у промисловості та комунальному господарстві, ускладнює уніфікацію вимог та створення єдиної системи нормування.

По-друге, залишається невизначеність процедур проведення інструментальних вимірювань концентрацій забруднюючих речовин на відповідність міжнародним стандартам ISO, що створює труднощі при порівнянні результатів вимірювань та їх нормативній оцінці.

По-третє, при спалюванні біомаси виникає необхідність перерахунку концентрацій забруднюючих речовин до іншого стандартного вмісту кисню в

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 59 |

сухих димових газах. Зокрема, перехід від стандартного вмісту кисню 11 % (характерного для біопаливних котлів) до 6 %, який використовується для твердого палива, призводить до зростання приведених концентрацій забруднюючих речовин приблизно у 1,5 раза. Це істотно впливає на результати порівняння з нормативними значеннями та потребує коректного методичного підходу.

Зазначені обставини зумовлюють необхідність поступового вдосконалення національної системи нормування викидів та її гармонізації з європейськими підходами, зокрема положеннями Директиви 2015/2193/ЄС.

Таким чином, система технологічного нормування викидів для теплосилових установок в Україні має багаторівневий характер і поступово адаптується до європейських вимог. Найбільш складним залишається сегмент установок середньої потужності (1–50 МВт), для яких актуальним є подальше вдосконалення методів вимірювань і уніфікація нормативних підходів.

2.3. План скорочення викидів від великих спалювальних установок

2.3.1. Передумови впровадження плану скорочення викидів

Україна, як сторона Договору про заснування Енергетичного Співтовариства, взяла на себе зобов'язання щодо поетапного впровадження екологічного законодавства Європейського Союзу у сфері обмеження викидів від великих спалювальних установок.

Відповідно до положень Додатка II до Договору та вимог Директиви 2001/80/ЄС, всі великі спалювальні установки повинні відповідати встановленим граничним значенням викидів. Проте технічний стан значної частини енергетичного обладнання України, обмежені фінансові ресурси операторів та великий обсяг необхідних модернізаційних заходів унеможлилювали досягнення цих вимог у встановлені терміни.

Саме ця невідповідність між регуляторними вимогами та фактичним станом енергетичних об'єктів зумовила необхідність розроблення Національного плану скорочення викидів.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 60 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

2.3.2. Сутність і механізм дії Національного плану скорочення викидів

Національний план скорочення викидів (НПСВ) є спеціальним перехідним механізмом, який дозволяє операторам великих спалювальних установок тимчасово відступити від негайного виконання граничних значень викидів, встановлених європейським законодавством, за умови поетапного скорочення сумарних викидів забруднюючих речовин у національному масштабі.

НПСВ передбачає встановлення річних граничних обсягів валових викидів для окремих забруднюючих речовин, зокрема:

- діоксиду сірки (SO₂);
- оксидів азоту (NO_x);
- речовин у вигляді суспендованих твердих частинок (пилу).

Таким чином, акцент переноситься з контролю окремих установок на управління сукупним впливом енергетичного сектору на атмосферне повітря.

2.3.3. Перехід від Директиви 2001/80/ЕС до Директиви 2010/75/EU

У процесі реалізації НПСВ Україна орієнтується не лише на вимоги Директиви 2001/80/ЕС, а й на більш жорсткі положення Директиви 2010/75/EU про промислові викиди, яка встановлює сучасні екологічні стандарти для нових та модернізованих спалювальних установок.

Відповідно до рішення Ради Міністрів Енергетичного Співтовариства, вимоги Директиви 2010/75/EU стають обов'язковими для великих спалювальних установок в Україні після завершення дії НПСВ, тобто з 1 січня 2034 року для оксидів азоту та з 1 січня 2029 року для пилу і діоксиду сірки.

Паралельно з посиленням вимог до великих спалювальних установок у законодавстві Європейського Союзу було усвідомлено необхідність окремого регулювання середніх спалювальних установок, які за сукупним впливом на атмосферне повітря становлять значну частку загальних викидів. Це зумовило ухвалення Директиви (EU) 2015/2193, яка доповнила існуючу систему екологічного регулювання та охопила установки номінальною тепловою потужністю від 1 до 50 МВт. З метою усунення можливих неоднозначностей у трактуванні дат ухвалення, строків практичного застосування та сфер дії

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 61 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

зазначених директив доцільно узагальнити їх ключові характеристики у вигляді порівняльної таблиці.

Хронологія та сфера застосування директив Європейського Союзу щодо обмеження викидів від спалювальних установок

Таблиця 10

| Директива ЄС | Рік ухвалення | Рік (період) практичного застосування | Об'єкт регулювання |
|---|---------------|--|---|
| Директива 2001/80/ЄС Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 | 2001 | 2008–2016 (у державах ЄС); для України — базова директива при формуванні НПСВ | Великі спалювальні установки (Large Combustion Plants, LCP) з номінальною тепловою потужністю ≥ 50 МВт |
| Директива 2010/75/EU (IED) Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions | 2010 | з 2013 р. — для нових установок у ЄС; після завершення НПСВ — для існуючих ВСУ в Україні | Промислові установки, у тому числі великі спалювальні установки; інтегроване регулювання промислових викидів |
| Директива (EU) 2015/2193 Directive (EU) 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 | 2015 | з 2018–2025 рр. (поетапно) у державах ЄС; в Україні — як орієнтир для гармонізації законодавства | Середні спалювальні установки (Medium Combustion Plants, MCP) з номінальною тепловою потужністю від 1 до 50 МВт |

У таблиці 10 наведено роки ухвалення директив Європейського Союзу та орієнтовні періоди їх практичного застосування. У ряді випадків рік ухвалення директиви не збігається з роком набуття чинності або початку обов'язкового

виконання її вимог, що обумовлено наявністю перехідних періодів та поетапним впровадженням нормативів.

2.3.4. Терміни дії та сфера застосування НПСВ

Національний план скорочення викидів вводиться в дію з 1 січня 2018 року та діє до 31 грудня 2033 року.

При цьому для окремих забруднюючих речовин встановлені різні кінцеві строки досягнення граничних значень викидів:

- для діоксиду сірки та пилу — до 31.12.2028 р.;
- для оксидів азоту — до 31.12.2033 р.

До НПСВ включаються існуючі великі спалювальні установки номінальною тепловою потужністю не менше 50 МВт, які отримали дозвіл на викиди до 1 липня 1992 року.

2.3.5. Установки з обмеженим терміном експлуатації

Окремі спалювальні установки можуть експлуатуватися в режимі обмеженого часу роботи (20 000 або 40 000 годин) за умови дотримання граничних значень викидів, чинних на 31.12.2017 року.

Після завершення дозволеного періоду експлуатації такі установки підлягають:

- виведенню з експлуатації, або
- заміні на нові установки, що відповідають вимогам Директиви 2010/75/EU.

2.3.6. Значення НПСВ для енергетичного сектору України

Реалізація Національного плану скорочення викидів дозволяє:

- забезпечити поступове скорочення викидів без різкого виведення генеруючих потужностей;
- зберегти енергетичну безпеку держави;
- створити передумови для модернізації енергетичних об'єктів із застосуванням сучасних газоочисних технологій.

Таким чином, НПСВ є компромісним інструментом між екологічними вимогами Європейського Союзу та реальними техніко-економічними можливостями енергетичного сектору України.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 63 |

3. Розрахункова частина

3.1. Вихідні дані для розрахунків

Для розрахунку було обрано паровий котел, що працює на вугіллі К-35-40 паропродуктивністю 35 т пари за годину.

Елементарний склад палива наступний

Робоча вологість $W_p := 14\%$

Робоча зольність $A_p := 20\%$

$W_{p_табл} := 13\%$ $A_{p_табл} := 21.8\%$ $S_{орк_табл} := 3.0\%$ $C_{p_табл} := 49.3\%$ $H_{p_табл} := 3.6\%$

$O_{p_табл} := 8.3\%$ $Q_{нр_табл} := 19.61 \frac{МДж}{кг}$ $V_{г_табл} := 44\%$ $N_{p_табл} := 1.0\%$

3.1.1. Розрахунок вхідної концентрації пилу

Розрахунок вхідної концентрації пилу в димових газах розраховуємо через коефіцієнт викиду за формулою:

$$k_{ТВ1} = \frac{10^6}{Q_i^r} a_{вин} \frac{A^r}{100 - \Gamma_{вин}}$$

Вміст золи становить $A^r = 22,067\%$ або $220,67 \text{ г/кг}$

Частка леткої золи (виносу) $a_{вин} = 0,95$

Вміст горючих в леткій золі $\Gamma_{вин} = 3\%$

Тоді

$$k_{ТВ1} = \frac{10^6}{19,222} 0,95 \frac{22,067}{100-3} = 11243 \text{ г/ГДж}$$

Між концентрацією забруднюючої речовини, мг/м^3 та коефіцієнтом викиду k , г/ГДж , справедлива рівність

$$c \times v = k \times Q_i^r$$

де v – питомий вихід сухих димових газів

| | | | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---|--------------------------------|-------|---------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | | | |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | | | |
| Розробив | | Гончаренко Д.О | | | Очищення димових газів від золи та діоксиду в мокром скрубєрі Вентурі для парового котла середньої потужності | Літера | Аркуш | Акрушів |
| Перевірів | | Вольчин І.А. | | | | | 58 | 68 |
| Н. Контр. | | | | | | НУХТ. каф. ТЕХТ ар. ТЕ-2-8М | | |
| | | | | | | | | |
| Затвердив | | Петренко В.П. | | | | | | |

Для вугільних котлів (6% кисню в сухих димових газах) застосовується інженерна

формула $\frac{v}{Q_i^r} = 0,365$

Для наших умов питомий вихід димових газів буде

$$v = 0,365 \times Q_i^r = 7,016 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Тому вхідну концентрацію пилу перед зололовлювачем можна визначити як

У подальших варіантних розрахунках (див. табл. 10) як розрахункову запиленість на вході до апарата прийнято $c_0 = 30804 \text{ мг/м}^3$.

Тоді мінімально необхідна ефективність очищення для досягнення $c_{\text{вих}} \leq 50 \text{ мг/м}^3$ становить $\eta_{\text{мін}} = (c_0 - c_{\text{вих}})/c_0 \cdot 100\% \approx 99,8$ (тобто не менше $\sim 99,8\%$).

Для отримання вихідної концентрації пилу нижче 50 мг/нм^3 потрібно мати ефективність зололовлювача не менше $\sim 99,8\%$.

3.1.2. Оцінка ефективності осадження пилу в трубі Вентурі

Формула для оцінки ефективності осадження твердих частинок краплями в трубі Вентурі:

$$\eta = 1 - Pt = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{q_w}{D_d \cdot \rho_l} \cdot \int_0^L \eta_\Sigma(x) \cdot \left| \frac{v_p(x) - v_d(x)}{v_d(x)} \right| dx\right)$$

де Pt – частка невловлених твердих частинок;

q_w – щільність розпилення потоку рідини, кг/м^3 ;

η_Σ – коефіцієнт осадження твердих частинок діаметром d_p на сферичні краплі діаметром D_d ;

ρ_p – густина рідини, кг/м^3 ;

v_p – швидкість частинок золи діаметром d_p , м/с ;

v_d – швидкість краплі діаметром D_d , м/с ;

L – довжина труби Вентурі від сопла до виходу з труби, м ;

x – координата вздовж осі труби Вентурі.

| | | | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--|--------------------------------|-------|---------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | | | |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | | | |
| Розробив | | Гончаренко Д.О | | | Очищення димових газів від золи та діоксиду в мокрому скрубєрі Вентурі для парового котла середньої потужності | Літера | Аркуш | Аркушів |
| Перевірів | | Вольчин І.А. | | | | | 58 | 68 |
| Н. Контр. | | | | | | НУХТ. каф. ТЕХТ ар. ТЕ-2-8М | | |
| | | | | | | | | |
| Затвердив | | Петренко В.П. | | | | | | |

При виборі таких робочих параметрів:

$$q_w = 0,4 \text{ кг/м}^3; \rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3; D_d = 100 \text{ мкм}; \eta_\Sigma = 1; \left| \frac{v_p(x) - v_d(x)}{v_d(x)} \right| = 0,18; L = 7 \text{ м}$$

частка невловлених твердих частинок становитиме $Pt = 5,21 \cdot 10^{-4}$, а ефективність осадження дорівнюватиме $\eta = 99,8\%$.

Розглянуто 6 варіантів розрахунку скрубера Вентурі для температури відхідних газів 140, 150 та 170 °С і також для кожної температури два варіанти тиску води перед скруберам 100 кПа та 300 кПа. Необхідно забезпечити зниження вмісту пилу з розрахункової виличини до 50 мг/м³.

Нижче представлено загальний вид скрубера Вентурі з вказанням основних розмірів, що потрібно визначити.

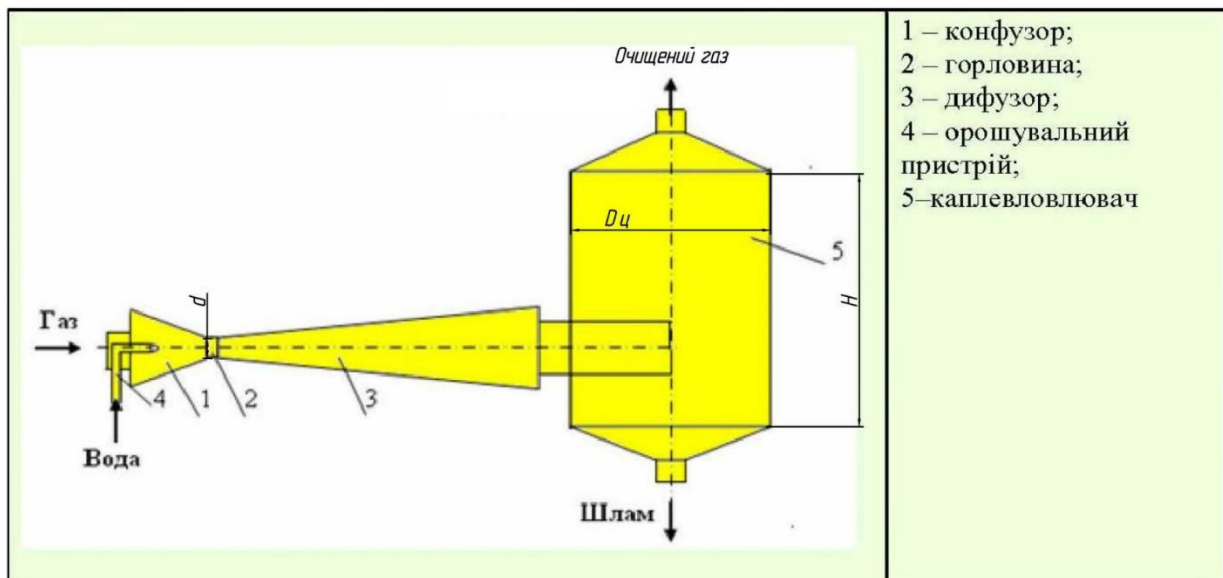


Рис.14 Загальний вид скрубера Вентурі

| | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------|--------|------|--------------------------------|-------|---------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | | |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | | |
| Розробив | Гончаренко Д.О | | | | Літера | Аркуш | Аркушів |
| Перевірів | Вольчин І.А. | | | | | 58 | 68 |
| Н. Контр. | | | | | НУХТ. каф. ТЕХТ гр. ТЕ-2-8М | | |
| Затвердив | Петренко В.П. | | | | | | |

Очищення димових газів від золи та діоксиду в мокрому скрубери Вентурі для парового котла середньої потужності

3.2. Результати варіантних розрахунків

Розрахунки котла та скрубера представлено в Додатках, А, Б, В, Г, Д, Е.

Нижче в таблиці 10 представимо результати варіантних розрахунків

Основні показники

Таблиця 10

| Варіант | Варіант | | | | | |
|---|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Температура відхідни газів | 140 | 140 | 150 | 150 | 170 | 170 |
| Тиск води на вході в скрубер | 300 | 100 | 300 | 100 | 300 | 100 |
| ККД котла, % | 89,63 | 89,63 | 89,06 | 89,06 | 87,93 | 87,93 |
| Витрата палива, кг/с | 1,572 | 1,572 | 1,582 | 1,582 | 1,603 | 1,603 |
| Коефіцієнт викиду речовини, г/ГДж | 11243 | 11243 | 11243 | 11243 | 11243 | 11243 |
| Початкова концентрація пилу, мг/м ³ | 30800 | 30800 | 30800 | 30800 | 30800 | 30800 |
| Кінцева концентрація пилу, мг/м ³ | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Питома енергія Кт, Па | 27041 | 27041 | 27041 | 27041 | 26991 | 26991 |
| витрату газу, який поступає в трубу Вентурі при робочих умовах, м ³ /с | 19,7 | 19,7 | 20,31 | 20,31 | 21,54 | 21,54 |
| діаметр циклона-каплевловлювача, м | 2,866 | 2,87 | 2,881 | 2,885 | 2,911 | 2,914 |
| висоту циклона-каплевловлювача, м | 7,166 | 7,175 | 7,20 | 7,21 | 7,277 | 7,286 |
| необхідну швидкість газів в горловині труби Вентурі, м/с | 83,73 | 86,98 | 83,48 | 86,75 | 83,00 | 86,26 |
| діаметр в горловині труби Вентури, м | 0,495 | 0,487 | 0,499 | 0,49 | 0,505 | 0,496 |

Порівняльний аналіз варіантів та вибір режиму роботи.

За даними табл. 10 всі розглянуті варіанти забезпечують доведення запиленості димових газів до 50 мг/м³ при початковій концентрації 30800 мг/м³. Відмінності між режимами проявляються у газодинаміці в горловині та в енергетичних показниках (питома енергія Кт).

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 67 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Зменшення тиску зрошувальної води з 300 до 100 кПа при незмінній температурі призводить до зростання необхідної швидкості газу в горловині приблизно на 3,25–3,27 м/с (наприклад: 83,73→86,98 м/с при 140 °С; 83,48→86,75 м/с при 150 °С; 83,00→86,26 м/с при 170 °С) та відповідного зменшення діаметра горловини на 0,008–0,009 м. При цьому значення K_t у парних варіантах (1–2, 3–4, 5–6) не змінюється.

Зі зростанням температури відхідних газів від 140 до 170 °С при незмінному тиску води спостерігається збільшення об'ємної витрати газу (19,7→21,54 м³/с), незначне зменшення потрібної швидкості в горловині (для 300 кПа: 83,73→83,00 м/с; для 100 кПа: 86,98→86,26 м/с) та збільшення діаметра горловини (наприклад, для 300 кПа: 0,495→0,505 м). Одночасно питома енергія K_t зменшується з 27041 до 26991 Па, що є позитивним з точки зору аеродинамічних витрат системи. Як базовий для проєктного опрацювання доцільно прийняти варіант з мінімальним $K_t = 26991$ Па (варіанти 5 або 6). За критерієм спрощення водяної частини та зниження вимог до насосного обладнання рекомендовано варіант 6 (170 °С; 100 кПа). Як альтернативний режим для зменшення швидкості в горловині (потенційно менші ерозійні навантаження) може бути прийнятий варіант 5 (170 °С; 300 кПа).

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 68 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

4. Висновки та рекомендації

4.1. Висновки

1. Виконано інженерне обґрунтування застосування скрубера Вентурі для мокрого пилоочищення димових газів вугільного котла К-35-40 (паропродуктивність 35 т/год) з цільовим доведенням запиленості до 50 мг/м³.
2. За результатами варіантних розрахунків встановлено, що при початковій концентрації пилу 30800-30850 мг/м³ кінцева концентрація 50 мг/м³ досягається для всіх 6 режимів, що підтверджує технологічну придатність прийнятого апарата.
3. Розглянуто 6 режимів (Тг = 140/150/170 °С; тиск води перед скруберам 100 та 300 кПа). Показано, що зміна тиску води з 300 до 100 кПа при незмінній температурі збільшує необхідну швидкість у горловині приблизно на 3,25–3,27 м/с і зменшує діаметр горловини на 0,008–0,009 м, при цьому питома енергія Кт у парних варіантах не змінюється.
4. Визначено, що необхідна швидкість газів у горловині труби Вентурі лежить у межах 83,00–86,98 м/с, що є основною розрахунковою характеристикою для узгодження з тяго-дутьовим обладнанням та оцінки ерозійного зносу.
5. Отримано діапазони конструктивних параметрів апарата: діаметр горловини 0,487–0,505 м; витрата газу у трубі Вентурі 19,7–21,54 м³/с; діаметр циклона-краплевловлювача 2,866–2,914 м; висота 7,166–7,286 м.
6. Встановлено вплив температури відхідних газів на показники котла: при підвищенні температури з 140 до 170 °С ККД котла зменшується з 89,63% до 87,93%, а витрата палива зростає з 1,572 до 1,603 кг/с, що підтверджує необхідність врахування режимів котла при проєктуванні газоочистки.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 69 |

7. Питома енергія K_t за розглянутими режимами становить 26991-27041 Па, причому мінімальні значення (26991 Па) отримані для варіантів при температурі 170 °С, що є позитивним з точки зору аеродинамічних витрат системи.

8. Для проєктного опрацювання рекомендовано приймати як базовий режим один із варіантів з мінімальним $K_t = 26991$ Па: варіант 6 (170 °С; 100 кПа) як більш простий щодо водяної частини, або варіант 5 (170 °С; 300 кПа) як альтернативний для зменшення швидкості в горловині.

4. 2. Рекомендації

1. Передбачити замкнений або частково замкнений водооборот із відстоюванням/фільтрацією шламу (відстійник, гідроциклон або фільтр-прес) та поверненням освітленої води в систему зрошення для зниження витрати води та стабілізації роботи форсунок.

2. Обов'язково застосовувати краплевловлювач (циклонного типу) та забезпечити контроль винесення крапель з метою запобігання зволоженню газоходів, корозії та вторинному винесенню пилу.

3. В експлуатації регламентувати контроль тиску/витрати зрошувальної води, стану форсунок та шламонакопичення, оскільки ці фактори найбільше впливають на реальну ефективність мокрої газоочистки.

4. Рекомендується впровадити контроль перепаду тиску на скрубєрі як оперативний індикатор відхилення режиму, засмічення або погіршення зрошення, а також як параметр енергоефективності.

5. Для подальшого розвитку роботи доцільно виконати техніко-економічне порівняння (CAPEX/OPEX) з сухими апаратами та оцінку ефективності уловлення для фракцій PM10/PM2.5 з урахуванням якості зрошувальної води.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.KMP.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 70 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |

Список використаних джерел

1. “Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів”. МЗ України. Наказ №173 від 19.06.96 р.
2. Борисенко С.В., Малый Л.П., Быковченко Г.И., Миненков Н.Л. Золоуловитель для сухой очистки дымовых газов ТЭС //Энергетика и Электрофикация, 1999, № 5. — С. 41-43.
3. Варламов Г.Б., Любчик Г.М., Маляренко В.А. Теплоэнергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. — К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2003. — 232 с.
4. ГКД 34.02.305-2002 "Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок". Методика визначення. Київ, 2002 р.
5. Горячев И.К. О разработке рукавных фильтров для теплоэнергетики //Теплоэнергетика. – 2002. - № 2. — С. 74-75.
6. Єрохін О.В., Осипенко В.Д., Поставничий В.В. Патент України «Рукавний фільтр». Бюл. №6 від 17.06.2002 р.
7. Журавльов Є.П. Екологічний вектор розвитку енергетики. //Экология и промышленность. – 2005. - № 32(3). — С. 26-31.
8. Закон України “Про охорону атмосферного повітря”. Постанова ВР 16.10.92.
9. Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища”. Постанова ВР 16.06.91 №1268ХІІ
10. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов / Справочни.–М.: Энергоатомиздат, 1992. — 176 с.
11. Збірник «Показники емісії викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря» Друга редакція. Том 1–3. Донецьк–2008 р
12. Зингерман Ю.Е., Трембач Т.Ф., Каменюка В.Б. Беспылевая выдача кокса на батареях коксохимических предприятий //Экология и промышленность. – 2005. - № 32(3).— С. 53-55.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 71 |

13. Інструкція про зміст та порядок складання звіту проведення інвентаризації викидів забруднюючих речовин на підприємстві КНД 211.2.3.014 – 95 К.: 1995

14. Ковалко М.П., Денисюк С. П. Энергозбереження пріоритетний напрямок державної політики України. — К.: Українські енциклопедичні знання, 1998. —511 с.

15. Корнелюк Н.М. Еколого-гігієнічна оцінка забруднення ґрунту важкими металами, як показника інтенсивності техногенного впливу (на прикладі м. Черкаси) //Вісник КДПУ ім. М. Остроградського – 2007. – Вип. 2 (43), Ч. 2. — С. 119-121.

16. Корнелюк Н.М., Мислюк О.О. Антропогенні фактори аеротехногенного забруднення м. Черкаси важкими металами //Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2007. – Вип. 4. — С. 48-53.

17. Корнелюк Н.М., Мислюк О.О. Природні і антропогенні фактори аеротехногенного забруднення м. Черкаси важкими металами. Повідомлення 1 //Вісник «Львівська політехніка». – 2007. - № 590. — С. 260-269.

18. Корчевой Ю.П., Вольчин И.А., Горбунов В.С и др. Экологические аспекты развития теплоэнергетики Украины //Энергетика и электрификация. – 2003. - № 2. — С. 45-50.

19. Корчевой Ю.П., Вольчин И.А., Потапов А.А., Ращепкін В.А. Про адміністративні та економічні важелі зменшення викидів у атмосферу від теплових електростанцій //Новини енергетики. – 2004. - № 3. — С. 45-52.

20. Корчевой Ю.П., Кузьменко Б.В., Майстренко А.Ю. Современные угольные энерготехнологии. — К.: УДЭНТЗ, 1998. —62 с.

21. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю. Современное состояние угольных электростанций Украины и перспективы их развития // Экотехнологии и ресурсосбережение, 1996, №3.— С. 3–8.

22. Мечты о ПГУ//Энергетическая политика Украины. – 2002. - № 4. — С. 50-57.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | 72 |

23. Н.А.Гусар, С.Г.Доманский, Л.П Яриш, Ф.Е.Гут. Некоторые мероприятия по уменьшению выбросов золы и окислов серы //Материалы первой Американско-украинской конференции.— К., 1996.— С. 188-189.

24. Наказ Мінприроди від 27.06.2006 р. N 309 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел». <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06>

25. Орхузська конвенція. //Бібліотека Всеукраїнської екологічної ліги. Серія: Охорона навколишнього середовища. — № 9. —2006. —33 с.

26. Осипенко В.Д., Осипенко В.В. и др. О применении рукавных фильтров в теплоэнергетике. //Энергетика и Электрофикация, 2004, №1. — С. 41-44.

27. Підвисоцький Р. Енергетична безпека і небезпека. //Надзвичайна ситуація. – 2000. -№ 1.— С. 14-17.

28. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1977. — 295 с.

29. Список гранично – допустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць, УкрНТЕК, 1998

30. Справочник по пыле- и золоулавливанию /М.И.Бергер, А.Ю.Вальдберг и др. /Под общ. ред. А.А. Русанова. — М.: Энергоиздат, 1983. —312 с.

31. Стан повітряного басейну Черкаської області у 2006 році. Черкаське обласне управління статистики, 2007.

32. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве. – М.: Металлургия, 1984. — 397 с.

33. Энергетика и охрана окружающей среды /Под ред. Н.Г. Залогина. — М.: Энергия, 1999.— 352 с.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
| | | | | | 00.КМР.144.003.001.ПЗ | Арку |
| | | | | | | 73 |
| Зм. | Арку | № докум. | Підпис | Дата | | |