

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять та виконання розрахункової
частини курсового проекту з курсу
«Обладнання захисту біосфери»

для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.(8).04010601 «Екологія
та охорона навколишнього середовища»

Частина 1

ОБЛАДНАННЯ ЗАХИСТУ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 03.02.2016 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2016

Методичні вказівки до практичних занять та виконання розрахункової частини курсової роботи з курсу «Обладнання захисту біосфери» для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.(8) 04010601 «Екологія та охорона навколишнього середовища». – Ч. 1 : Обладнання захисту повітряного басейну / Уклад.: Самойленко Н. М., Аверченко В. І. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – 40 с.

Укладачі: Н. М. Самойленко,
В. І. Аверченко

Кафедра хімічної техніки та промислової екології

ПЕРЕДМОВА

Виробничі процеси на підприємствах супроводжуються утворенням великої кількості забруднювачів, для видалення яких із викидів застосовуються різноманітні методи очистки та відповідне за конструкцією обладнання. У даних вказівках наводяться методики та приклади розрахунку найбільш поширеного очисного обладнання, що призначене для очистки викидів від забруднюючих речовин. При цьому враховувалось, що методики розрахунку апаратів очистки викидів від газо- і пароподібних забруднювачів вже вивчалися студентами в інших дисциплінах.

1. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ВИБОРУ СПОСОБУ ТА АПАРАТУ ДЛЯ ОЧИСТКИ І ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВИКИДІВ

Сучасний підхід до попередження забруднення атмосферного повітря антропогенною діяльністю вимагає використання таких технологічних процесів та обладнання, що повністю виключають утворення викидів забруднюючих речовин або максимально їх зменшують. Разом з тим у теперішній час актуальною є розробка та застосування вискоелективних систем очистки для вловлювання забруднюючих речовин та подальшої їх утилізації.

Загальні рекомендації по вибору способу очистки можуть бути запропоновані на основі теоретичного та практичного досвіду щодо техніки вловлювання і знезараження викидів. При цьому слід відзначити, що при розгляді конкретних проектних завдань необхідно аналізувати інформацію про умови утворення викидів, склад та властивості забруднювачів, а також корисного використання продуктів, які утворюються у процесі очистки і ін. Крім того, сучасні системи очистки викидів повинні передбачати відбір тепла нагрітих викидів, яке може бути використане для технологічних процесів та обігріву приміщень, а також нагрівання води чи повітря в інших цілях.

Технологічні і аспіраційні викиди промислових підприємств є складними аерозольними системами. Вони містять забруднювачі різного агрегатного складу: пил сировини або готового продукту, газоподібні компоненти, аерозолі. При цьому дисперсний склад твердих частинок міняється у широких межах. Концентрація шкідливих речовин у вентиляційних викидах промислових підприємств невелика, але їх обсяг досить значний.

Існуючі особливості викидів ускладнюють вибір очисного обладнання, його експлуатацію у оптимальному режимі та потребують застосування багатоступінчастих систем очищення. У промислових схемах очистки викидів використовується паралельне і послідовне з'єднання апаратів. Про послідовному з'єднанні не відбувається поділу проміжних потоків. Така схема підвищує ефективність очистки викидів. Паралельне з'єднання застосовують при необхідності очищення великих обсягів газу і відносно малій продуктивності одиничних апаратів. На практиці воно менше застосовується, ніж послідовне.

Основними характеристиками очисного апарату є ефективність очистки викиду від конкретного забруднювача, гідравлічний опір, експлуатаційна надійність, вартість очистки, продуктивність по забрудненому газу та енергоємність, що визначається величиною витрат енергії на очистку 1000 м³ газу. Крім того, при пиловловлюванні суттєвим фактором при підборі того чи іншого апарату є дисперсність пилу.

У практичному проектуванні для розробки очисних систем або окремого апарату замовник надає розробнику вихідні дані у зазначеному обсязі.

Існує досить розгалужена система класифікації способів очистки викидів від пилу. Для знепилювання використовуються способи:

- фізичні (аеродинамічні, гідродинамічні, фільтраційні), електричні, магнітні, акустичні, оптичні, іонізуючі, термічні;
- фізико-хімічні;
- хімічні;
- біохімічні;
- фізико-біохімічні.

У своїй основі такі способи базуються на одному або декількох процесах, а саме: осадження, коагуляції, видалення, знезараження, спалювання й уловлювання.

Очищення викидів від газоподібних домішок здійснюється: абсорбцією, хемосорбцією, термічними методами, каталітичною (у тому числі фотокаталітичною), біологічною очисткою, озонним, плазмохімічним та іншими методами.

2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ОЧИСНИХ АПАРАТІВ

2.1. Розрахунок і вибір рукавних фільтрів

2.1.1. Методика проведення розрахунку

Рукавні тканинні фільтри застосовуються для очистки великих об'ємів забруднених газів, які мають значну концентрацію пилу (250 г/м^3 і більше). Вони забезпечують тонку очистку повітря від пилових часток, розміром менше 1 мкм. Як і циклони, такі фільтри являються одним із основних видів пиловловлюючого обладнання. Рукавні фільтри широко застосовуються на підприємствах чорної та кольорової металургії, хімічної промисловості, в енергетичних установках, а також в промисловості будівельних матеріалів, харчовій промисловості та ін.

При здійсненні технологічного розрахунку рукавного фільтру визначають: площу фільтрувальної перегородки, гідравлічний опір перегородки та апарату в цілому; частоту і тривалості циклів регенерації фільтруючих елементів. При цьому враховується:

- характеристика забруднених газів на вході у фільтр (середня об'ємна витрата газу при робочих та нормальних умовах, склад газів та їх вибухонебезпечність, температура і тиск, допустимість підсосу, вміст вологи, точка роси);

- властивості пилу (тип пилу по механізму утворення, розподіл часток за розмірами, середня і максимальна масова концентрації, вміст токсичних речовин, хімічний склад пилу, його гігроскопічність і розчинність у воді, схильність до злипання, вибуховість і горючість, істинна і насипна щільності, електризуємість, абразивність, ГДК);

- характеристика джерела виділення пилу (технологічні відомості про процес та обладнання, періодичність або безперервність процесу, місце відсмоктування запиленних газів, конструкційні матеріали, які використовуються у технологічному обладнанні);

- відомості і вимоги щодо уловленого пилу (цінність, можливість регенерації та повернення у виробництво чи утилізація в інших виробництвах, спосіб вивантаження, транспортування і упаковки);

- основні вимоги до фільтрів: допустимий опір фільтра, задана величина вихідної концентрації, розмір установки, необхідна площа, місце розташування, допоміжне обладнання, кліматичні умови, ліміти по воді, пари, електроенергії, можливість проведення процесу при аварійній зупинці фільтра, капітальні та експлуатаційні витрати.

Крім того, враховується ефективність очистки викидів.

Ступінь очистки, тип фільтра, спосіб регенерації фільтрувального шару та матеріал тканини рукавів обґрунтовуються з урахуванням фізико-хімічних характеристик викидів, техніко-економічних умов, характеру виробництва. Разом з тим, у практиці проектування установок фільтрації ступінь очистки не обчислюють, а приймають по інформації, що приводиться в каталогах заводів -виготовлювачів. Така величина може розглядатись як оцінна.

Площа фільтрації тканинного фільтру розраховується за формулою:

$$F_{\phi} = (V_1 + V_2) / (60Q), \quad (2.1)$$

де F_{ϕ} – площа фільтрації в одночасно працюючих секціях, м²; V_1 – об’ємна витрата газів, що очищаються, з врахуванням підсосу повітря у фільтрі, м³/год.; V_2 – об’ємна витрата повітря, що подається на регенерацію, м³/год (визначається по технічним характеристикам вибраного фільтру або розраховується за формулою (2.5)); Q – питоме газове навантаження на тканину, м³/м²·хв.

Питоми газове навантаження на фільтрувальну перегородку коливається для рукавних фільтрів від 0,3 до 6 м³/м²·хв). Всередині цього діапазону вибір оптимального значення залежить від багатьох факторів, до яких в першу чергу відносяться властивості уловлюваної пилу, спосіб регенерації фільтрувальних елементів, концентрація пилу в газі, структура фільтрувального матеріалу, температура газів, що очищаються. З достатньою для практичних розрахунків точністю питоми газове навантаження в рукавних фільтрах визначають з наступного виразу:

$$Q = Q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5, \quad (2.2)$$

де Q_n – нормативне питоми газове навантаження, м³/м²·хв) (додаток 1); C_1 – коефіцієнт, що характеризує систему регенерації фільтруючих елементів (додаток 2); C_2 – коефіцієнт, що враховує вплив вхідної концентрації пилу на питоми газове навантаження (додаток 3); C_3 – коефіцієнт, що враховує вплив дисперсного складу пилу в газі (додаток 4); C_4 – коефіцієнт, що враховує вплив температури забрудненого газу (додаток 5); C_5 – коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення газу від пилу (при концентрації пилу у забрудненому газі до 30 мг/м³ дорівнює 1, при концентраціях пилу, що не перевищує 10 мг/м³, дорівнює 0,95).

Основні властивості найбільш поширених фільтрувальних тканин приведені у додатку 6.

Для коефіцієнта C_1 , що враховує вплив особливостей регенерації фільтрувальних елементів, в якості базового варіанту приймається фільтр з імпульсною продувкою стисненим повітрям з рукавами з тканини. Для цього апарата коефіцієнт $C_1 = 1$. При використанні рукавів з нетканих матеріалів значення коефіцієнту може збільшуватися на 5 – 10%. Для фільтрів з регенерацією шляхом зворотного продування і одночасного струшування або похитування рукавів приймається коефіцієнт $C_1 = 0,70 - 0,8$. Менше значення приймається для більш щільної тканини. При регенерації шляхом тільки зворотного продування $C_1 = 0,55 - 0,70$.

Концентрація пилу (коефіцієнт C_2) позначається на тривалості циклу фільтрування. При збільшенні концентрації збільшується частота регенерації і питоме навантаження повинне знижуватися. Однак залежність питомого навантаження від концентрації пилу не є лінійною функцією. Найбільш помітно зміна концентрації проявляє себе в інтервалі концентрацій 1–30 г/м³. При більш високих значеннях посилюється вплив коагуляції частинок пилу, і його частина у вигляді агломератів падає в бункер до осадження на фільтрувальних елементах.

Якщо регенерацію проводять з відключенням секцій, то до робочої площі фільтрації F_ϕ додавають величину F_p і одержують загальну площу фільтрації $F_{заг}$.

Для фільтрів з імпульсною та зворотною струменевою продувкою відключення секцій не потрібно. Загальна фільтруюча поверхня приймається рівній робочій.

Площа регенерації обчислюється за формулою:

$$F_p = (N_c \cdot F_c \cdot \tau_p \cdot n) / 3600, \quad (2.3)$$

де N_c – число секцій; F_c – площа однієї секції, м²; τ_p – тривалість регенерації секції, с; n – кількість регенерацій фільтру протягом 1 години.

Періоди роботи фільтру між регенерацією струшуванням або продуванням можна розрахувати виходячи із граничної пилоємності фільтрувальної тканини (г/м²) або орієнтовно, залежно від вхідної запиленості. Наприклад, при вхідній запиленості 20 г/м³ період між регенерацією складає 4–7 с. Разом з тим оцінювально можливо прийняти $n = 1-10$. В середньому тривалість однієї регенерації залежить від способу регенерації

і може становити від 2 до 15 с. Для деяких фільтрів це значення збільшується до 40 с.

Більш точно значення n можна розрахувати за формулою:

$$n_p = 3600 / (t + \tau_p), \quad (2.4)$$

де t – період роботи фільтра між регенераціями, с; τ_p – тривалість однієї регенерації, с.

$$t = [(\Delta P_\phi / \mu \cdot w) - A] / (B \cdot w \cdot C_{ex}),$$

де ΔP_ϕ – гідравлічний опір фільтра, Па; μ – динамічна в'язкість газу, Па·с; w – швидкість фільтрування, м/с; A – постійна фільтрування, м⁻¹.

A залежить від гідравлічного опору тканини, медіанного діаметру часток пилу, пористості тканини та пористості шару пилу, який осів на фільтрі.

B – постійна фільтрування, м/кг.

B залежить від медіанного діаметру часток пилу, а також від пористості шару пилу, який осів на фільтрі, і густини пилових часток.

C_{ex} – концентрація пилу на вході у фільтр, кг/м³.

Об'ємна витрата повітря (м³/с), що подається на регенерацію, визначається за співвідношення

$$V_2 = (K \cdot V_1 \cdot n \cdot \tau_p) / 3600, \quad (2.5)$$

де K – коефіцієнт, що враховує збільшення витрати (швидкості) продувального повітря, приймається в межах 1,5–2,0.

При підборі рукавних фільтрів важливим є оцінка очікуваного гідравлічного опору, що визначає енергетичні витрати на фільтрування. Звичайно він вказується у технічних характеристиках вибраного фільтру. Якщо необхідно розрахувати гідравлічний опір, то користуються наступними формулами.

Гідравлічний опір фільтра в Па складається з опору корпусу ΔP_κ і опору фільтрувальної перегородки ΔP_n

$$\Delta P_\phi = \Delta P_\kappa + \Delta P_n. \quad (2.6)$$

В загальному виді гідравлічний опір може бути оцінений коефіцієнтом опору корпусу апарату, який віднесений до швидкості газу у вхідному патрубку.

$$\varepsilon_{\kappa} = \Delta P_{\kappa} / (V_{\text{вх}}^2 \cdot \rho_{\text{г}}), \quad (2.7)$$

де $V_{\text{вх}}$ – швидкість газу у вхідному патрубку, м/с; $\rho_{\text{г}}$ – густина газу, кг/м³

Величина ξ_{κ} при конструюванні фільтрів звичайно приймається рівною 1,5 – 2,0.

$$V_{\text{вх}} = V_1 / (3600 \cdot S_{\text{вх}}), \quad (2.8)$$

де $S_{\text{вх}}$ – площа вхідного перерізу патрубка, м

Гідравлічний опір фільтрувальної перегородки включає втрати напору за рахунок самої перегородки (ΔP_n^1) і втрати за рахунок осілого на перегородку пилу (ΔP_n^{11}):

$$\Delta P_n = \Delta P_n^1 + \Delta P_n^{11}. \quad (2.9)$$

Величину ΔP_n^1 (в Па) обчислюють за виразом:

$$\Delta P_n^1 = K_n \cdot \mu \cdot w^n, \quad (2.10)$$

де K_n – коефіцієнт, що характеризує опір фільтрувальної перегородки, м⁻¹; μ – динамічна в'язкість газу, Па·с; w – швидкість фільтрування, м/с; n – показник ступеню, що залежить від режиму течії газу крізь перегородку (для ламінарного режиму $n = 1$, для турбулентного $n > 1$).

Коефіцієнт K_n , який залежить від товщини та проникливості фільтрувальної перегородки, властивостей і кількості пилу, що залишився після регенерації на перегородці, визначається експериментально.

Для фільтрувальних тканин з лавсану, що вловлюють цементний або кварцовий пил з медіанним діаметром часток в межах 10–20 мкм, $K_n = (1100–1500) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, для тих же матеріалів при вловлюванні возгонів від сталеплавильних дугових печей з медіанним діаметром часток 2,5–3,0 мкм $K_n = (2300–2400) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Для більш щільних тканин (склотканина) для такого пилу коефіцієнт K_n збільшується в 1,2–1,3 рази. При уловлюванні пилу розміром частинок менше 1 мкм коефіцієнт K_n збіль-

шується в 2-3 рази. При уловлюванні возгонів кремнію з медіанним діаметром 0,6 мкм він становить $(13000-15000) \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$. Наведені значення коефіцієнтів не ураховують можливе збільшення його в присутності вологи. Вони використовуються при розрахунках гідравлічного опору фільтрів з імпульсним продуванням. У фільтрах зі зворотним продуванням після регенерації значення K_n необхідно збільшити на 15–25 %.

Опір в Па, викликаний пилом, що осів на перегородку, розраховується з рівняння:

$$\Delta P_n^{11} = \mu \cdot \tau \cdot C_{ex} \cdot V^2 K_1, \quad (2.11)$$

де τ – тривалість фільтрувального циклу, с; C_{ex} – концентрація пилу на вході у фільтр, кг/м^3 ; V – швидкість потоку запиленого повітря у вихідному патрубку, м/с; K_1 – параметр опору шару пилу, м/кг.

Величина K_1 залежить від властивостей пилу і пористості шару пилу на перегородці. Для цементу з медіанним діаметром часток $d_m = 12-20$ мкм $K_1 = (6,5-16) \cdot 10^9$ м/кг, для частинок кремнію з $d_m = 0,7$ мкм $K_1 = 330 \cdot 10^9$ м/кг, для возгонів сталеплавильної дугової печі з $d_m = 3$ мкм $K_1 = 80 \cdot 10^9$ м/кг.

Якщо загальний гідравлічний опір фільтру з урахуванням площі поверхні, яка регенерується, перевищує допустиму величину (2800 Па), то необхідно змінити марку фільтру на таку, що має більшу площу, та провести повторні розрахунки.

Вибір марки фільтру проводиться згідно додатку 7 та джерела інформації [4].

2.1.2. Приклади виконання розрахунків

Приклад 1. Розрахувати рукавний фільтр по наступним вихідним даним: об'ємна витрата газу, що надходить на очищення $V_n = 55000 \text{ м}^3 / \text{год}$; температура викидів $t = 130 \text{ }^\circ\text{C}$; концентрація возгону кольорового металу на вході в апарат очистки $C_{ex} = 5 \text{ г/м}^3$, медіанний діаметр частинок пилу $d_m = 3$ мкм; вміст пилу після фільтра C_{ex} не повинен перевищувати 5 мг/м^3 . Густина газу $\rho_g = 0,607 \text{ кг/м}^3$. Динамічна в'язкість газу $\mu = 1,2 \times 10^{-5} \text{ Па с}$.

В якості фільтрувальної тканини рекомендується лавсан. Фільтр має імпульсну регенерацію зі швидкістю фільтрації 0,027–0,03 м/с.

Рішення.

Відповідно до додатків 1–5 пил має:

- нормативне питоме газове навантаження $Q_n = 1,2$;
- коефіцієнти: $C_1 = 1$; $C_2 = 1,04$; $C_3 = 0,9$; $C_4 = 0,725$; $C_5 = 0,95$.

Питоме газове навантаження становить:

$$Q = Q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 = 1,2 \cdot 1 \cdot 1,04 \cdot 0,9 \cdot 0,725 \cdot 0,95 = 0,768 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв}).$$

Фільтруюча поверхня апарату:

$$F_\phi = (V_n) / (60Q) = 55000 / (60 \cdot 0,768) = 1193,6 \text{ м}^2.$$

За каталогом [3] знаходимо найбільш відповідний розрахованій поверхні фільтр. Ним є рукавний фільтр марки ФРІР-1200 з площею фільтруючої поверхні 1200 м². Фільтр має імпульсну регенерацію стисненим повітрям. Період фільтрування складає 4 хв.

Визначаємо гідравлічний опір фільтрувальної перегородки при $K_n = 2,3 \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$; $K_1 = 80 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$; $V = 0,027 \text{ м/с}$; $n = 1$. Приймаємо, що швидкість потоку запиленого повітря V відповідає швидкості фільтрування w .

$$\begin{aligned} \Delta P_n &= \Delta P_n^1 + \Delta P_n^{11} = K_n \cdot \mu \cdot w^n + \mu \cdot \tau \cdot C_{\text{ex}} \cdot V^2 \cdot K_1 = \\ &= 2,3 \cdot 10^9 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,027 + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 240 \cdot 5 \cdot 10^{-3} (0,027)^2 \cdot 80 \cdot 10^9 = \\ &= 1585,1 \text{ Па}; \end{aligned}$$

$$V_{\text{ex}} = V_n / (3600 \cdot S_{\text{ex}}) = 55000 / (3600 \cdot 1,32) = 55000 / 4752 = 11,57 \text{ м/с}.$$

Гідравлічний опір корпусу фільтра:

$$\Delta P_\kappa = \xi_\kappa \cdot V_{\text{ex}}^2 \cdot \rho_\rho / 2 = 2 \cdot 11,57^2 \cdot 0,607 / 2 = 81,26 \text{ Па}.$$

Загальний гідравлічний опір фільтру

$$\Delta P_\phi = \Delta P_\kappa + \Delta P_n = 1585,1 + 81,26 = 1666,36 \text{ Па}.$$

Загальний опір фільтру не перевищує нормативне значення. Це означає, що розрахунок проведено правильно.

Приклад 2. Розрахувати рукавний фільтр із тканини нітрон для очистки газів агломераційного виробництва при наступних даних: витра-

та газів перед фільтром $V_n = 80$ тис. м³/год; температура газу $t_z = 150$ °С; динамічний коефіцієнт в'язкості при робочих умовах $\mu_{o,e} = 23,1 \cdot 10^{-6}$ Па с; густина газу перед фільтром $\rho_o = 0,998$ кг/м³; надлишковий тиск перед фільтром $P = 30$ Па; концентрація пилу у газі перед фільтром $c_{ex} = 7,5$ г/м³; середній діаметр часток $d_m = 1$ мкм; барометричний тиск 101,3 кПа. Регенерація зворотною продувкою.

Рішення

Припустима температура для тканини нітрон (t_{mk}) складає 130 °С. Об'єм присосу повітря (V_{on}) з температурою 30 °С ($t_{нов}$) перед фільтром, який необхідний для охолодження:

$$V_{on}/V_n = (t_z - t_{mk}) / (t_{mk} - t_{нов}) = (150 - 130) / (130 - 30) = 0,2;$$

$$V_{on} = 0,2 V_n.$$

Загальна витрата повітря, що іде на фільтрацію з урахуванням присосу повітря у фільтрі:

$$V_{заг} = (V_n + 0,2V_n) / 3600 = 26,67 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Витрати газу, який поступає на фільтрацію при робочих умовах:

$$V_z = V_{заг} \left[\frac{(273 + t_{mk}) \cdot 101,3}{273 \cdot (101,3 + P)} \right] =$$

$$= 26,67 \left[\frac{(273 + 130) \cdot 101,3}{273 \cdot (101,3 + 0,03)} \right] = 39,36 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Нормативне питоме газове навантаження складає

$$Q_n = 1,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв}); C_1 = 0,8; C_2 = 1,03; C_3 = 0,9; C_4 = 0,73; C_5 = 0,95.$$

Питоме газове навантаження становить:

$$Q = Q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5;$$

$$Q = 1,7 \cdot 0,8 \cdot 1,03 \cdot 0,9 \cdot 0,73 \cdot 0,95 =$$

$$= 0,85 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв}) \text{ або } 0,014 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Гідравлічний опір фільтрувальної перегородки при $K_n = 1500 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $K_1 = 20 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$, $w = 0,015 \text{ м/с}$, $\tau = 600 \text{ с}$, $V_{ex} = 8 \text{ м/с}$ складає:

$$\Delta P_n = \Delta P_n^1 + \Delta P_n^{11} = K_n \cdot \mu \cdot w^n + \mu \cdot \tau \cdot C_{ex} \cdot V^2 \cdot K_1 =$$

$$= 1500 \cdot 10^6 \cdot 23,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,015 + 23,1 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,000225 \times$$

$$\times 20 \cdot 10^9 = 987,53 \text{ Па};$$

$$\Delta P_\kappa = \xi_\kappa \cdot V_{ex}^2 \cdot \rho_z / 2 = (2 \cdot 8^2 \cdot 0,998) / 2 = 63,87 \text{ Па}.$$

Загальний гідравлічний опір фільтра

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{\kappa} + \Delta P_n = 987,53 + 63,87 = 1051,4 \text{ Па.}$$

Витрати повітря на регенерацію V_p розраховують, приймаючи, що:

– швидкість зворотного продування рівна швидкості фільтрування;

$$- n = 15; \quad \tau_p = 5 \text{ с;}$$

$$V_p = K \cdot V_e \cdot n \cdot \tau_p = (1,5 \cdot 39,36 \cdot 15 \cdot 5) / 3600 = 1,23 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Фільтруюча поверхня складає:

$$F_{\phi} = (V_e + V_p) / Q = (39,36 + 1,23) / 0,014 = 2899,3 \text{ м}^2.$$

За додатком 7 вибираємо для установки два 8-секційних фільтра марки ФРО-1650 з площею фільтрації 1688 м². Площа фільтрації кожної секції складає :

$$F_c = F_{\phi} / N_c = 1688 / 8 = 211 \text{ м}^2.$$

Площа фільтрування, що виключається на регенерацію на двох фільтрах на протязі 1 год:

$$F_p = (2F_c \cdot \tau_p \cdot n) / 3600 = (2 \cdot 211 \cdot 5 \cdot 15) / 3600 = 8,8 \text{ м}^2.$$

Уточнена кількість повітря, що йде на продувку при регенерації фільтру при швидкості продувки $w_{\text{продувки}} \approx w = 0,015 \text{ м/с}$:

$$V_p = F_p \cdot w = (8,8 \cdot 0,015) = 0,13 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Остаточна площа фільтрування:

$$F_{\phi} = (V_e + V_p) / Q + F_p = (39,36 + 0,13) / 0,014 + 8,8 = 2829,5 \text{ м}^2.$$

Остаточна площа фільтрування близька до площі фільтрування вибраної марки фільтру. Відмінність складає 2,4 %. Розрахунок проведено вірно.

Завдання 1. Підібрати та розрахувати рукавний фільтр на основі даних таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані для розрахунку рукавного фільтру

Варіант	Витрати газу, м ³ /год	Температура газу / повітря, °С	Барометричний тиск, кПа	Надлишковий тиск перед фільтром, Па	Концентрація пилу у газі, г/м ³	Вид пилу	Середній медіанний розмір пилу, мкм
1	3000	200/10	99	10	10	Металеві порошки	2
2	4500	220/18	99,5	12	0,9	Картонний пил	5
3	5800	240/24	100	15	0,5	Металеві порошки	3
4	8400	190/33	100,5	22	33	Активоване вугілля	5
5	9200	270/41	101	28	1	Тальк	12
6	12800	330/25	101,5	0	56	Глинозем	10
7	13300	140/18	99	5	65	Кокс	9
8	25000	110/23	99,5	12	23	Цемент	5
9	9200	270/41	101	28	1	Тальк	12
10	43900	300/12	100,5	18	28	Цукор	6

2.2. Розрахунок і вибір електрофільтру

Електрофільтри – найбільш ефективні апарати для очищення викидів від пилу. Ступінь очистки викидів у них досягає 99,99 %, а концентрація змінюється у широкому діапазоні: від кількох мг до 200 г/м³. Продуктивність фільтру значна і може складати сотні тисяч м³/год. Температура викидів – до 500 °С. До достоїнства фільтрів відноситься можливість їх роботи з вологими викидами, які характеризуються корозійною активністю.

Існує декілька методик розрахунку електрофільтрів з різним ступенем деталізації. При цьому обов'язковим є визначення площі активної зони по заданому об'єму забрудненого газу та його рекомендованій швидкості, а також ефективності очистки. Повний розрахунок фільтру включає визначення електричних параметрів, які у даних методичних вказівках не розглядаються.

Якщо вихідні дані для розрахунку не включають значення при робочих умовах густини (ρ_r) та об'єму забрудненого газу (Q_p), то їх визначають по формулам:

$$\rho_e = \rho_o \cdot [(P_a - P_e) / P_a] \cdot [273 / (273 + T)],$$

де ρ_o – густина газу перед електрофільтром, кг/м³; P_a – атмосферний тиск, кПа; P_e – розрідження газу в електрофільтрі, кПа; T – температура газу на вході в електрофільтр, °С.

$$Q_p = (Q_o \rho_o) / 3600 \cdot \rho_e,$$

де Q_o – витрати газу перед електрофільтром, м³/год.

Для часток розміром $d_q = 2-50$ мкм швидкість дрейфу часток (w_d) розраховується за рівнянням:

$$w_d = (0,059 \cdot 10^{-10} E^2 d_q) / \mu,$$

де E – напруженість електричного поля, В/м.

Для електрофільтрів сухої очистки $E = 30 \cdot 10^4$ В/м.

μ – в'язкість газів, Па с.

Активний переріз електрофільтру S складає:

$$S = K \cdot Q_p / V,$$

де $K = 1,1$ — коефіцієнт запасу, який враховує підсмоктування атмосферного повітря; V — швидкість газу в активному перетині, м/с.

Питома поверхня осадження електрофільтру (f):

$$f = S^1 / Q_p,$$

де S^1 — площа осаджувальних електродів, м²

Ступінь очистки газу в електрофільтрі визначається (η):

$$\eta = [1 - \exp(-w_o \cdot f)] 100\% .$$

Приклад. Підібрати та розрахувати електрофільтр типу ЕГУ, який використовується для очистки газів руднотермічних печей за таких умов: витрати газу перед подачею у електрофільтр $Q = 15500$ м³/год, кількість печей $n = 3$, густина газу перед електрофільтром $\rho_o = 1,38$ кг/м³, розрідження газу в електрофільтрі $P_e = 2000$ Па, температура газу $t = 180$ °С, в'язкість суміші газів $\mu = 41,7 \cdot 10^{-6}$ Па с, атмосферний тиск $P_a = 101,3$ кПа. Розмір часток складає 5–35 мкм. Ступінь очищення повинна бути не нижче $\eta = 0,97$

Густина газу при робочих умовах:

$$\begin{aligned} \rho_e &= \rho_o \left[\frac{(P_a - P_e)}{P_a} \right] \cdot \left[\frac{273}{(273 + T)} \right] = \\ &= 1,38 [(101,3 - 2) / 101,3] \cdot [273 / (273 + 180)] = 0,815 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Витрати газу при робочих умовах:

$$Q_p = n \cdot Q_o \cdot \rho_o / 3600 \cdot \rho_e = 3 \cdot 15500 \cdot 1,38 / 3600 \cdot 0,815 = 21,87 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Швидкість дрейфу найменших (5 мкм) та найбільших часток (35 мкм):

$$w_o (5) = 0,059 \cdot 10^{-10} (30 \cdot 10^4)^2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} / 41,7 \cdot 10^{-6} = 0,064 \text{ м/с};$$

$$w_o (35) = 0,059 \cdot 10^{-10} (30 \cdot 10^4)^2 \cdot 35 \cdot 10^{-6} / 41,7 \cdot 10^{-6} = 0,446 \text{ м/с}.$$

Швидкість газу в активному перерізі електрофільтру складає 0,8–2,0 м/с. Приймаємо $V = 1,0$ м/с.

Тоді необхідна площа активного перерізу:

$$S = K \cdot Q_p / V = 1,1 \cdot 21,87 / 1,0 = 24,05 \text{ м}^2.$$

По знайденій площі з каталогу [5] вибираємо електрофільтр ЕГУ1-10/400-7,5-6/3.84-3-30, який має площу активного перерізу $S_a = 27 \text{ м}^2$. Площа осаджувальних електродів складає 1720 м^2 .

Тоді фактична швидкість фільтрації в активному полі апарату складає:

$$V^1 = Q_p / S_a = 21,87 / 27 = 0,81 \text{ м/с.}$$

Питома поверхня осадження:

$$f = S^1 / Q_p = 1720 / 21,87 = 78,65 \text{ м}^2 \cdot \text{с/м}^3.$$

Ступінь очистки газу в електрофільтрі визначається для часток 5 мкм, які мають найменшу швидкість дрейфу:

$$\begin{aligned} \eta &= [1 - \exp(-w_d \cdot f)] 100\% = \\ &= [1 - \exp(-0,064 \cdot 78,65)] 100\% = 99,31\%. \end{aligned}$$

Одержаний ступінь очистки вище заданого, а отже вибраний фільтр забезпечує необхідну ефективність очистки.

Завдання 2. На основі даних таблиці 2.2 підібрати та розрахувати електрофільтр типу ЕГУ для очистки викидів, що містять пил з розміром часток 5–35 мкм.

Таблиця 2.2 – Дані для розрахунку електрофільтру

Варіант	Розрядження в системі, Па	Об'ємні витрати газу при робочих умовах, м ³ /с	Температура газу, °С	В'язкість газу при робочій температурі, 10 ⁻⁵ , Па·с	Густина газу перед фільтром, кг/м ³
1	2000	36,0	200	1,50	0,539
2	2250	49,0	180	1,45	0,521
3	2500	107	140	1,25	0,449
4	3000	130	120	1,20	0,432
5	3500	32,0	80	1,10	0,396
6	4000	9,10	40	1,45	0,521
7	4250	10,40	200	1,30	0,467
8	4500	15,50	180	1,25	0,449
9	5000	23,10	160	1,20	0,432
10	2000	28,10	240	1,25	0,449

2.3. Розрахунок полого скрубера

Полі форсункові скрубери – порожньотілі колони, у яких гази контактують з краплями рідини, що утворюються за рахунок її розпилю форсунками. Вони застосовуються для очистки газів від досить великих часток, що мають діаметр більше 10 мкм. Ефективність очистки викидів у апаратах залежить від дисперсності пилу, розміру крапель, швидкості їх падіння, витрати рідини, швидкості пилового потоку. Звичайно ступінь очищення викидів від пилу у полих скруберах не є достатнім, тому вони можуть використовуватись у якості апаратів попередньої очистки.

Полі скрубери часто застосовуються з метою охолодження газів (при їх температурі не менше 200 °С), а також зволоження газів перед апаратами тонкої очистки. При цьому у охолоджувальні скрубери подається велика кількість води, яка тільки нагрівається, але не випаровується.

Полі скрубери можуть використовуватись у металургійному, хімічному виробництві, виробництві литва та будматеріалів і ін.

Методика розрахунку скрубера для охолодження газів

Основними характеристиками при розрахунку скрубера є кількість тепла, яке віддається газом у процесі охолодження до заданої температури, а також об'єм, габарити скрубера, витрати води на охолодження.

Кількість тепла, яке газ повинен віддати при охолодженні, визначається по формулі:

$$Q = V_{oc} [C(t_1 - t_2) + Y_n(i_1 - i_2)],$$

де V_{oc} – витрати сухого газу, що охолоджується, м³/с; C – об'ємна теплоємність газу (або суміші газів) при н.у., кДж/(м³·°С); t_1 та t_2 – температура відповідно початкового та кінцевого стану газу, °С; i_1 та i_2 – ентальпія водяного пару у газі відповідно до та після охолодження, кДж/м³; Y_n – вологоємність газу до охолодження, кг/м³.

Початкова i_1 та кінцева i_2 ентальпія водяних парів визначається за рівняннями:

$$i_1 = 2480 + 1,96 t_1; \quad i_2 = 2480 + 1,96 t_2.$$

Середня різниця температур газу та води у скрубєрі обчислюється за рівнянням:

$$\Delta t = [(t_1 - t_k) - (t_2 - t_n)] / 2,31 \lg [(t_1 - t_k) / (t_2 - t_n)],$$

де t_n та t_k – початкова та кінцева температура води.

Швидкість газового потоку у скрубєрі складає 0,8–1,5 м/с.

Необхідний робочий об'єм скрубєру V_p :

$$V_p = Q / (k \Delta t),$$

де k – об'ємний коефіцієнт теплопередачі у скрубєрі, Вт / (м³·К).

У полих скрубєрах $k = 60 - 240$ Вт/(м³·К).

Δt – середня різниця температур газу та рідини, °С.

Витрати води на скрубєр (кг/с):

$$M_g = Q / [a(i_n - i_{gn}) + (1 - a)(i_{вк} - i_{gn})],$$

де a – коефіцієнт випарювання води (від 0,45 до 0,55); i_n – ентальпія насиченої пари при температурі мокрого термометра t_m , кДж/кг (додаток 9);

i_{gn} – ентальпія води при початковій температурі t_n , кДж/кг (додаток 10);

$i_{вк}$ – ентальпія води при кінцевій температурі t_k , кДж/кг (додаток 10);

t_k приймається на 5–8 °С нижче t_m .

Вміст вологи на виході із скрубєру Y_k при робочих умовах складає:

$$Y_k = Y_n + (a \cdot M_g) / V_{oc},$$

де V_{oc} – витрати сухого газу у скрубєрі при н.у.

Витрати газу на виході із скрубєра при робочих умовах:

$$Y_o = Y_o [(0,804 + Y_k)(273 + t_2) / 0,804 \cdot 273].$$

Приклад. Розрахувати скрубєр для охолодження газів металургійного виробництва за наступних умов: витрати газу, що охолоджуються

(при н.у.) $Y_o = 150$ тис. $\text{м}^3/\text{год}$; температура газу $t_1 = 300$ $^{\circ}\text{C}$; вологемність газу $Y_n = 50$ $\text{г}/\text{м}^3$; початкова температура води $t_{\text{вн}} = 20$ $^{\circ}\text{C}$. Швидкість газу у скрубєрі – 1,5 $\text{м}/\text{с}$.

Витрати газу в скрубєрі при н.у. V_{oc} визначаються за формулою:

$$V_{oc} = (V_o \cdot 0,804) / (0,804 + Y_n) =$$

$$= (150\,000 \cdot 0,804) / 3600 (0,804 + 0,05) = 39,23 \text{ м}^3/\text{с},$$

0,804 – маса 1 м^3 водяної пари паров при н.у., кг .

Згідно табл. 2.3 температура мокрого термометру, до якої можливо охолодити газ, $t_m = t_2 = 59,5$ $^{\circ}\text{C}$. Кінцева температура води приймається на 5–10 $^{\circ}\text{C}$ нижче температури мокрого термометра, $t_k = 55$ $^{\circ}\text{C}$.

Початкова та кінцева ентальпія водяних парів:

$$i_1 = 2480 + 1,96 t_1 = 2480 + 1,96 \cdot 300 = 3068 \text{ кДж}/\text{м}^3;$$

$$i_2 = 2480 + 1,96 t_2 = 2480 + 1,96 \cdot 59,5 = 2597 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Кількість тепла, яку газ повинен віддати при охолодженні:

$$Q = V_{oc} [C(t_1 - t_2) + Y_n (i_1 - i_2)],$$

де C – теплоємність сухого газу, $c = 1,3$ $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$

Таблиця 2.3 – Температура мокрого термометру при різних початкових температурах газу та його вологемності

Початкова вологемність газу, $\text{г}/\text{м}^3$	Значення температури мокрого термометру при початковій температурі гарячого газу, $^{\circ}\text{C}$						
	100	200	300	400	500	750	1000
25	38,5	49,5	57	62	65,5	72,5	77,5
50	44	53,5	59,5	64	67,5	74	78,5
100	52,5	59	63,5	68	70,5	76,5	80,5
200	61	66,5	70	72,5	75,5	79,5	–
300	68	71,5	74	78,5	–	–	–

$$Q = 39,23 [1,3 \cdot (300 - 59,5) + 0,05 \cdot (3068 - 2597)] = 13189 \text{ кВт}.$$

Середня різниця температур газу та води у скрубери:

$$\begin{aligned}\Delta t &= [(t_1 - t_k) - (t_2 - t_{en})] / 2, 3 \lg [(t_1 - t_k) / (t_2 - t_n)] = \\ &= [(300 - 55) - (59,5 - 20)] / 2,3 \lg [(300 - 55) / (59,5 - 20)] = \\ &= 113 \text{ }^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

Приймаємо $k = 140 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$. Тоді необхідний робочий об'єм скрубери V_p :

$$V_p = Q / (k \Delta t) = 13189 / 140 \cdot 113 = 0,83 \text{ м}^3.$$

Витрати води на скрубери:

$$M_g = Q / [a(i_n - i_{en}) + (1 - a)(i_{ек} - i_{en})],$$

де a приймається рівним 0,5. За довідковими даними ентальпія насиченої водяної пари i_n при температурі 59,5 °C складає 2609 кДж/кг (додаток 9). Ентальпія води i_{en} при початковій температурі 20° та ентальпія води $i_{ек}$ при кінцевій температурі 55° відповідно складає 83,95 кДж/кг та 230,24 кДж/кг (додаток 10).

$$M_g = 13189 / [0,5(2609 - 83,95) + (1 - 0,5)(230,24 - 83,95)] = 9,87 \text{ кг/с}.$$

Вміст вологи на виході із скрубери Y_k при робочих умовах:

$$Y_k = Y_n + (a \cdot M_g) / V_{oc} = 0,05 + (0,5 \cdot 9,87) / 39,23 = 0,13 \text{ кг/м}^3.$$

Витрати газу на виході із скрубери

$$\begin{aligned}Y_2 &= Y_o [(0,804 + Y_k)(273 + t_2) / 0,804 \cdot 273] = \\ &= 39,23 [(0,804 + 0,13)(273 + 59,5) / 0,804 \cdot 273] = 55,4 \text{ м}^3/\text{с}.\end{aligned}$$

Геометричні розміри скрубери визначаються з урахуванням розрахованого об'єму $V_p = 0,83 \text{ м}^3$. Висота скрубери H складає 2,5–4 D , де D – діаметр скрубери. Приймаємо $H = 3 D$.

$$V_p = 0,785 D^2 H. \text{ Звідки } D = 0,70 \text{ м, а } H = 2,1 \text{ м}.$$

Завдання 3. Розрахувати скрубери для охолодження газів згідно даних табл. 2.4

Таблиця 2.4 – Дані для проведення розрахунків скрубєру для охолодження викидів

Варіант	Витрати газу, що охолоджується, тис. м ³ /год	Температура газу, °С	Початкова температура води, °С	Вологоємність газу, г/м ³
1	200	160	21	18
2	130	300	22	30
3	100	173	20	25
4	95	202	25	29
5	70	220	19	50
6	65	180	18	45
7	50	250	20	30
8	45	199	18	35
9	30	170	19	25
10	15	224	22	40

2.4. Розрахунок скрубєру Вєнтурі

Скрбєри Вєнтурі серед мокрих пиловловлювачів характеризуються найбільшою ефективністю очищення газів від дрібнодисперсного пилу. Ефективність їх очистки залежить від швидкості газів у горловині, питомих витрат води на зрошення, способу зрошення, вибору краплєвловлювача і швидкості газу у ньому, геометричного розміру труби. Скрбєри знаходять широке застосування у чорній, кольоровій металургії, енергетиці, хімічній і нафтовій промисловості.

При розрахунку скрубєру Вєнтурі визначають такі основні характеристики: ступінь очистки, питому енергію, що витрачається на пило вловлювання; витрати зрошувальної рідини, гідравлічний опір труби, швидкість газу в ній, а також її діаметр.

Методика розрахунку скрубєру Вєнтурі

Необхідний ступінь очистки газу у скрубєрі η розраховується як:

$$\eta = 1 - C_{\text{ex}} / C_{\text{вих}}$$

де C_{ex} і $C_{\text{вих}}$ – відповідно вхідна та вихідна концентрація забруднюючої речовини у викиді, г/м³.

Питома енергія K_q в кДж, яка витрачається на пиловловлювання 1000 м^3 газу, визначається з виразу:

$$K_q = \exp \left\{ \left[\ln^{-\ln(1-\eta)/B} \right] / X \right\},$$

де B та X – параметри, що залежать від виду пилу (табл. 2.5)

Загальний гідравлічний опір скрубера ΔP складає:

$$\Delta P = K_q - P_g m,$$

де P_g – напір рідини, яка подається на зрошення, кДж; m – питома витрата рідини, що подається на зрошення, $\text{дм}^3 / \text{м}^3$.

При вловлюванні мілкодисперсного пилу та центральній подачі рідини через сопло значення m приймають рівним $0,005\text{--}0,007 \text{ м}^3/\text{м}^3$; при уловлюванні грубодисперсного пилу у низьконапірних трубах $m = 0,001\text{--}0,002 \text{ м}^3/\text{м}^3$. При цьому напір рідини, що розпилюється, складає $300\text{--}350$ кПа.

Питомі витрати води залежать від швидкості газів у скрубери. Рекомендуються:

– при швидкості газу $70\text{--}100$ м/с m приймається в межах $(0,25\text{--}0,4) 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{м}^3$;

– при швидкості газу $40\text{--}70$ м/с m складає $(0,4\text{--}1,25) 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{м}^3$.

Густина газу ρ_g на вході у скрубери при робочих умовах складає:

$$\rho_g = \rho_o \cdot [273(101,3 - P_1)] / [(273 + T_g)101,3],$$

де ρ_o – густина газу, що поступає на очистку при н.у., $\text{кг} / \text{м}^3$; P_1 – розрідження перед трубою Вентурі, кПа; T_g – температура газу, °С.

Об'ємна витрата газу, який поступає на очистку при робочих умовах V_p , визначається як:

$$V_p = V_o \rho_o / \rho_g,$$

де V_o – витрати газу, що поступає на очистку, $\text{м}^3/\text{год}$

Витрати зрошувальної рідини M складають: $M = m V_p$.

Гідралічний опір труби Вентурі ΔP_{mp} розраховується як:

$$\Delta P_{mp} = \Delta P - P_{kp},$$

де P_{kp} – гідралічний опір краплевлловлювача, Па.

Температура газу на виході із труби Вентурі T_{κ} обчислюється за формулою:

$$T_{\kappa} = (0,133 - 0,041m) T_2 + 35.$$

Густина газу на виході із труби ρ_{κ} складає:

$$\rho_{\kappa} = \rho_o \cdot \left[273(101,3 - P_1 - \Delta P_{mp}) / (273 + T_{\kappa}) 101,3 \right].$$

Об'ємні витрати газу на виході із труби $V_{вих}$ визначаються за формулою

$$V_{вих} = V_o \rho_o / \rho_{\kappa}$$

Діаметр циклона – краплевлловлювача D визначається при швидкості газу у циклоні $W_{\kappa} = 2,5$ м/с:

$$D = 1,13 \sqrt{\frac{V_{вих}}{W_{\kappa}}}.$$

Висота циклону H дорівнює $2,5 D = 4,75$ м.

Гідралічний опір циклону ΔP_{κ} :

$$\Delta P_{\kappa} = (\xi w_{\kappa}^2 \rho_{\kappa}) / 2,$$

де ξ – коефіцієнт опору циклону-краплевлловлювача.

Коефіцієнт опору, який зумовлений введенням рідини, що зрошує, для нормалізованої труби Вентурі:

$$\xi_{жс} = 0,63 \xi_c m^{-0,3},$$

де $\xi_c = 0,145$ – коефіцієнт опору «сухої» нормалізованої труби Вентурі.

Необхідна швидкість газів у горловині труби Вентурі W_v :

$$W_v = \left[(2\Delta P_{mp}) / (\xi_c \rho_k + \xi_{жс} \rho_{жс} m) \right]^{1/2},$$

де $\rho_{жс}$ – густина рідини, що зрошує. Для води $\rho_{жс} = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Діаметр горловини труби Вентурі d розраховується за формулою:

$$d = 1,13 (V_{вих} / W_v)^{1/2}.$$

Одержаний результат діаметра горловини (мм) округлюють до найближчого стандартного діаметру: 115, 135, 155, 180, 200, 240, 280, 320, 370, 420. По ньому за довідниковими даними вибираємо марку скрубера Вентурі (додаток 11), а також відповідний проведеним розрахункам циклон – краплевловлювач (додаток 12).

Приклад. Розрахувати скрубера Вентурі для очистки відхідних газів від ваграночного пилю. Вихідні дані: витрати газу $V = 20\,000 \text{ м}^3/\text{год}$, коефіцієнт опору циклону – краплевловлювача $\xi = 32$, температура газу $T_g = 80^\circ\text{C}$, розрідження перед трубою $P_1 = 1,2 \text{ кПа}$, густина газу при н.у. $\rho_o = 1,43 \text{ кг/м}^3$, концентрація пилю в газі $C_{вх} = 1 \text{ г/м}^3$, температура води, що поступає на зрошення під напором $P_g = 300 \text{ кДж}$, $T_n = 20^\circ\text{C}$, концентрація пилю на виході із апарату $C_{вих} = 25 \text{ мг/м}^3$, питома витрата води на зрошення $m = 1,2 \text{ дм}^3/\text{м}^3$ ($0,0012 \text{ м}^3/\text{м}^3$). Гідравлічний опір краплевловлювача $P_{кр} = 100 \text{ Па}$.

Необхідний ступінь очистки:

$$\eta = 1 - C_{вх} / C_{вих} = 1 - 0,025 / 1 = 0,975 \approx 0,98.$$

Питома енергія, яка витрачається на пиловловлювання K_q (кДж/1000 м^3 газу) визначається з виразу:

$$K_q = \exp \left\{ \left[\ln^{-\ln(1-\eta)/B} \right] / X \right\}.$$

Згідно даних таблиці 2.5 коефіцієнт $X = 0,6210$, а $B = 1,355 \cdot 10^{-2}$
Тоді питома енергія K_q складає:

$$K_q = \exp\left\{\left[\ln^{-\ln(1-0,98)/0,001355}\right] / 0,6210\right\} = 9136 \text{ Дж/м}^3$$

Таблиця 2.5 – Значення коефіцієнтів B та X для різного роду пилу

Вид пилу	B	X
Ваграночний пил	$1,355 \cdot 10^{-2}$	0,6210
Пил доменної печі	0,1925	0,3255
Пил вапнякових печей	$6,5 \cdot 10^{-4}$	1,0529
Пил мартенівських печей, що працюють на кисневому дутті	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
Пил мартенівських печей, що працюють на повітряному дутті	$1,74 \cdot 10^{-6}$	1,594
Зола димових газів ТЕС	$4,34 \cdot 10^{-3}$	0,3

Загальний гідравлічний опір скрубелу:

$$\Delta P = K_q - P_o m = 9136 - 300 \cdot 10^3 \cdot 0,0012 = 8776 \text{ Па.}$$

Густина газу на вході в скрубел при робочих умовах складає:

$$\rho_z = \rho_o \cdot \left[\frac{273(101,3 - P_1)}{(273 + T_z)101,3} \right] =$$

$$= 1,43 \left[\frac{273(101,3 - 1,2)}{(273 + 80)101,3} \right] = 1,09 \text{ кг/м}^3.$$

Об'ємна витрата газу, який поступає на очистку при робочих умовах:

$$V_p = V_o \rho_o / \rho_z = 20\,000 \cdot 1,43 / 1,09 = 26239 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Витрати зрошувальної рідини:

$$M = m V_p = 0,0012 \cdot 26239 = 31,49 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Гідравлічний опір труби Вентурі:

$$\Delta P_{mp} = \Delta P - P_{sp} = 8776 - 100 = 8676 \text{ Па.}$$

Температура газу на виході із труби Вентурі:

$$T_k = (0,133 - 0,041m) T_z + 35 =$$

$$= (0,133 - 0,041 \cdot 0,0012) 80 + 35 = 45,6 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Густина газу на виході із труби:

$$\rho_{\kappa} = \rho_o \cdot \left[273(101,3 - P_1 - \Delta P_{mp}) / (273 + T_{\kappa}) 101,3 \right] = \\ = 1,43 \cdot [273(101,3 - 1,2 - 8,676) / (273 + 45,6) 101,3] = 1,11 \text{ кг/м}^3.$$

Об'ємні витрати газу на виході із труби:

$$V_{вих} = V_o \rho_o / \rho_{\kappa} = 20\,000 \cdot 1,43 / 1,11 \cdot 3600 = 7,16 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Діаметр циклона – краплевлловлювача визначається при швидкості газу у циклоні $W_u = 2,5 \text{ м/с}$.

$$d = 1,13(V_{вих} / W_u)^{1/2} = 1,13(7,16/2,5)^{1/2} = 1,9 \text{ м}.$$

Висота циклону $H = 2,5 \cdot D = 4,75 \text{ м}$.

Гідравлічний опір циклону

$$\Delta P_u = (\xi w_u^2 \rho_{\kappa}) / 2 = (32 \cdot 2,5^2 \cdot 1,11) / 2 = 111 \text{ Па}.$$

Коефіцієнт опору, який обумовлений введенням рідини, що зрошує, для нормалізованої труби Вентурі:

$$\xi_{жс} = 0,63 \xi_c m^{-0,3} = 0,63 \cdot 0,145 \cdot 0,0012^{-0,3} = 0,69,$$

де $\xi_c = 0,145$ – коефіцієнт опору «сухої» нормалізованої труби Вентурі

Необхідна швидкість газів у горловині труби Вентурі:

$$W_z = \left[(2\Delta P_{mp}) / (\xi_c \rho_{\kappa} + \xi_{жс} \rho_{жс} m) \right]^{1/2} = \\ = [(2 \cdot 8676) / (0,145 \cdot 1,11 + 0,69 \cdot 1000 \cdot 0,0012)]^{1/2} = 132,5 \text{ м/с}.$$

$\rho_{жс}$ – густина води, 1000 кг/м^3 .

Діаметр горловини труби Вентурі:

$$d = 1,13(V_{вих} / W_z)^{1/2} = 1,13(7,16 / 132,3)^{1/2} = 0,262 \text{ м}.$$

Одержаний розрахунковий діаметр округляємо до найближчого стандартного розміру 280 мм. По ньому вибираємо скруббер типу ГВПВ-0,06 (додаток 11). За додатком 12 вибираємо краплевлловлювач КЦТ-2000.

Завдання 4. Розрахувати скруббер Вентурі для очистки газів, якщо зрошування здійснюється через сопло з напором 350 кПа. Розрідження перед очисткою складає 5 кПа. Питома енергія, яка витрачається на пиловловлювання – 8545 кДж/1000 м³ газу, гідравлічний опір пиловловлювача – 100 Па. Коефіцієнт опору «сухої» нормалізованої труби рівняється 0,145, а коефіцієнт опору циклону – краплевлловлювача – 32.

Таблиця 2.6 – Вихідні дані для проведення розрахунків скрубера

Варіант	Витрати газу, тис.м ³ /год	Температура газу, °С	Концентрація пилу у газі, г/м ³		Густина газу при н.у., кг/м ³
			на вході	на виході	
1	2	3	4	5	6
1	100	70	1,0	0,03	1,29
2	120	75	1,7	0,07	1,14
3	140	80	1,5	0,05	1,31
4	150	60	1,2	0,01	1,28
5	180	65	1,4	0,02	1,34
6	190	70	1,5	0,06	1,45
7	210	75	1,0	0,03	1,25
8	160	80	1,6	0,04	1,43
9	140	65	1,7	0,07	1,27
10	80	80	1,0	0,01	1,81

Список джерел інформації

1. Ветошкин, А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки [Текст] : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.

2. Ратушняк, Г. С. Технічні засоби очищення газових викидів [Текст] : навч. посіб. / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лелюк. – Вінниця : ВНТУ. – 2005. – 158 с.

3. Каталог очисного обладнання. Фільтри рукавні [Електронний ресурс] / ВАТ НПП «Дніпроенергосталь». – Режим доступу: <http://destal.net/filtry-rukavnye-frir/106075/>. – Загол. з екрану.

4. Фильтр с обратной продувкой FS 620/2,5/300 NEDERMAN [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<http://konstrack.com/catalog/pyilegazoochistka-i-promyishlennyye-sistemy-pyileudaleniya/rukavnie-filtry/filtr-s-obratnoy-produvkoj-fs-620-2-5-300-nederman>. – Загол. з екрану

5. Каталог очисного обладнання. Електрофільтри [Електронний ресурс] / ВАТ НПП «Дніпроенергосталь». – Режим доступу: <http://www.progress.ua/catalog/elektrofiltry/elektrofiltry-tipa-egu/>

ДОДАТКИ

Додаток 1 – Значення нормативного питомого газового навантаження Q_n залежно від виду пилю

Значення $Q_n, \text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$				
3,5	2,6	2,0	1,7	1,2
Мука	Азбест	Глинозем	Кокс	Активоване вугілля
Пил шкіри	Гіпс	Цемент	Летка зола	Миючі засоби
Тирса	Сіль	Керамічні барвники	Оксиди металів	Возгони кольорових та чорних металів
Картонний пил	Пісок	Вугілля	Металеві порошки	
Полівінілхлорид	Тальк	Плавикий шпат	Пластмаси	
Борошно	Гума	Гума	Барвники	
Зерно	Каолін	Каолін	Силікати	
Тютюн	Пил при вибиванні виливок	Вапняк	Крохмаль	
	Піщаний абразивний пил	Цукор	Смоли	
		Пил гірських порід		

Додаток 2 – Значення коефіцієнта C_1 залежно від особливостей регенерації фільтрувальних елементів

Спосіб регенерації	C_1
Регенерація фільтрувальних елементів з тканини імпульсним продуванням стислим газом При використанні рукавів з нетканих матеріалів значення C_1 може збільшуватися на 5–10 %	1,0
Регенерація шляхом зворотного продування і одночасного струшування або похитування рукавів	0,70–0,85
Регенерація шляхом зворотного продування	0,55–0,70

Додаток 3 – Значення коефіцієнта C_2 , що враховує вплив вхідної концентрації пилю $C_{\text{вх}}$

$C_{\text{вх}}, \text{г}/\text{м}^3$	2	5	10	20	40	60	80	100
C_2	1,5	1,04	1,0	0,96	0,9	0,87	0,85	0,83

Додаток 4 – Значення коефіцієнта C_3 , що враховує вплив дисперсного складу пилу на питоме газове навантаження

Медіанний діаметр часток пилу d_m , мкм	C_3
Більше 100	1,2–1,4
50–100	1,1
10–50	1,0
3–10	0,9
Менше 3	0,7–0,9

Додаток 5 – Значення коефіцієнта C_4 , який враховує вплив температури газу, що очищується

Температура газу, °C	20	40	60	80	100	120	140	60
C_4	1,0	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,70

Додаток 6 – Термостійкість фільтрувальних тканин

Тканина	Термостійкість, °C	
	при тривалій дії	при короткочасній дії
Сукно № 2	65–85	90–85
Нітрон	120–130	150
Лавсан	130	160
Хлорин № 5231	65–70	80–90
Склотканина ТССНФ	240	315
Поліамід	240	260
Поліпропилен	90	110
Полівінілосульфід	190	220
Мета–Арамід	200	250
Поліестер	140	160

Додаток 7 – Фільтри рукавні типу ФРО

Модель фільтра								
Технічна характеристика	ФРО 1250-1	ФРО 1650-1	ФРО 2500-1	ФРО 4100-2	ФРО 5100-2	ФРО 6000-2	ФРО 7000-2	ФРО 8000-2
Фільтруюча поверхня,м ²	1266	1688	2530	4104	5130	6156	7182	8208
Кількість рукавів	252	336	504	432	540	646	756	864
Кількість секцій	86	8	12	8	10	12	14	16
Висота /довжина рукава,м	8/5,10	8/6,60	8/9,60	10/12,6	10/15,6	10/18,6	10/21,6	10/24,6
Діаметр рукава,мм	200	200	200	300	300	300	300	300
Ширина,м	6,84	6,84	6,84	9,84	9,84	9,84	9,84	9,84
Висота,м	13,77	50,4	75,6	108,5	136	162,8	190	217

Примітка: рукава фільтрів типу ФРО виготовляються із лавсану, нітрону, поліфену, склотканини.

Додаток 8 – Фільтри типу ФР зі зворотним посекційним продуванням

Показник	Марка фільтра			
	ФР-250	ФР-2800	ФР-5000	ФР-10000
Фільтрувальна поверхня, м ²	ФР-250	ФР-2800	ФР-5000	ФР-10000
Число секцій	4	6	8	8
Число рукавів	288	2304	4032	висотою: 3,7 м - 19204, 4,7 м - 3840
Діаметр рукава, мм	127/135	127	127	135
Висота рукава, м	2,3	3,1	3,1	3,7/4,7
Допустимий надмірний тиск в апараті, кПа	2,5	2,5	2,5	3,5
Тиск стислого повітря при роботі пневмоциліндрів, МПа	0,4–0,6	0,4–0,6	0,4–0,6	0,4–0,6
Витрати стислого повітря на 1 хід поршня, л	0,55	0,55	0,55	0,55
Габаритні розміри, м:				
довжина	7,4	23,0	28,8	31,6
ширина	3,9	7,3	7,0	10,7
висота	7,9	15,0	14,5	16,6

Додаток 9 – Ентальпія насиченої водяної пари

Температура, °С	Тиск, кПа	Питома ентальпія, кДж/кг	Температура, °С	Тиск, кПа	Питома ентальпія, кДж/кг
1	2	3	4	5	6
0,0	0,611	2501	180	$1,003 \cdot 10^3$	2777
0,01	0,611	2501	190	$1,225 \cdot 10^3$	2785
4	0,8129	2508	200	$1,555 \cdot 10^3$	2791
10	1,227	2519	210	$1,908 \cdot 10^3$	2796
15	1,704	2529	220	$2,320 \cdot 10^3$	2800
20	2,337	2538	230	$2,798 \cdot 10^3$	2802
30	4,242	2556	240	$3,348 \cdot 10^3$	2802
40	7,375	2574	250	$3,978 \cdot 10^3$	2799
50	12,33	2592	260	$4,694 \cdot 10^3$	2795
60	19,92	2609	270	$5,505 \cdot 10^3$	2788
70	31,15	2627	280	$6,419 \cdot 10^3$	2779
80	47,36	2644	290	$7,445 \cdot 10^3$	2765
90	70,11	2660	300	$8,592 \cdot 10^3$	2749
100	101,32	2676	310	$9,870 \cdot 10^3$	2727
110	143,3	2692	320	$11,29 \cdot 10^3$	2700
120	198,5	2707	330	$12,86 \cdot 10^3$	2665
130	270,1	2721	340	$14,61 \cdot 10^3$	2622
140	361,4	2734	350	$16,54 \cdot 10^3$	2566
150	476	2746	360	$18,67 \cdot 10^3$	2486
160	618	2758	370	$21,05 \cdot 10^3$	2336
170	792	2768	374	$22,08 \cdot 10^3$	2151

Додаток 10 – Ентальпія води при температурах від 0 до 100 °С

Температура, °С	Тиск, кПа	Питома ентальпія, кДж/кг	Температура, °С	Тиск, кПа	Питома ентальпія, кДж/кг
10	1227	42,09	34	5318	142,47
11	1312	46,28	35	5622	146,64
12	1402	50,47	36	5940	150,82
13	1497	54,66	37	6274	155,00
14	1597	58,85	38	6624	159,18
15	1704	63,04	39	6991	163,36
16	1817	67,22	40	7375	167,54
17	1936	71,41	41	7777	171,71
18	2063	75,59	42	8198	175,89
19	2196	79,77	43	8639	180,05
20	2337	83,95	44	9100	184,25
21	2486	88,14	45	9582	188,43
22	2642	92,32	46	10085	192,61
23	2808	96,50	47	10612	196,79
24	2982	100,68	48	11161	200,97
25	3166	104,86	49	11735	205,15
21	2486	88,14	50	12335	209,33
22	2642	92,32	51	12960	213,51
26	3360	109,04	52	13612	217,69
27	3564	113,22	53	14292	221,88
28	3779	117,39	54	15001	226,06
29	4004	121,57	55	15740	230,24
30	4242	125,75	56	16510	234,42
31	4491	129,93	57	17312	238,61
32	4454	134,11	58	18146	242,79
33	5029	138,29	59	19015	246,97

Додаток 11 – Технічна характеристика скрубєрів

Показник	Типорозмір									
	ГВПВ-0,006	ГВПВ-0,006-01	ГВПВ-0,010	ГВПВ-0,010-01	ГВПВ-0,014	ГВПВ-0,014-01	ГВПВ-0,019	ГВПВ-0,019-01	ГВПВ-0,025	ГВПВ-0,025-01
Пропускна здатність по газу, що очищується, м ³ /год	1700–3500		3100–6500		4140–8400		5590–11340		7490-15120	
Діаметр горловини, мм	85		115		135		155		180	
Витрати рідини, що зрошує, м ³ /год, не більше	1,18–3,2	3,2–6,84	2,16–5	5–2,6	2,9–5	5–6,8	3,9–13	13–22,7	5,2–13	13–30
Тиск рідини перед форсунками, кПа	180–370	60–130	80–410	60–40	80–40	60–700	80–980	420–710	150–980	80–450
Площа перетину контактної зони, м ²	0,006		0,010		0,014		0,019		0,025	
Масова концентрація речовини на вході, г/м ³ , не більше	30									
Гідравлічний опір, кПа, не більше	6–12									

Продовження таблиці додатка 11

Показник	Типорозмір											
	ГВПВ-0,03	ГВПВ-0,03-01	ГВПВ-0,045	ГВПВ-0,045-01	ГВПВ-0,06	ГВПВ-0,06-01	ГВПВ-0,080	ГВПВ-0,080-01	ГВПВ-0,100	ГВПВ-0,100-01	ГВПВ-0,140	ГВПВ-0,140-01
Пропускна здатність м ³ /год	9320–18900		13800–28000		18630–37800		23460–47600		32430–65800		41400–84000	
Діаметр горловини, мм	200		240		280		320		370		420	
Витрати рідини, що зрошує, м ³ /год	6,5–13	13–38	9,75–30	30–56	13–30	30–75,6	16,8–45	45–95,2	22,6–45	45–95,2	28,8–45	45–168
Тиск рідини перед форсунками, кПа	60–250	100–910	60–570	110–390	100–570	110–710	80–570	110–500	80–320	60–540	130–320	60–800
Площа перетину контактної зони, м ²	0,030		0,045		0,060		0,080		0,1		0,14	
Масова концентрація речовини на вході, г/м ³	30											
Гідралічний опір, кПа	6-12											

Додаток 12 – Краплевлловлювачі типу КЦТ

Краплевлловлювачі використовуються у якості краплевлловлювачів у скруберах Вентурі або самостійних апаратів для вловлювання виносу крапель з основного технологічного обладнання. Краплевлловлювач являє собою прямоточний циклон з вхідним патрубком прямокутного перетину сечення і вихідним патрубком круглого перетину.

Умовні позначення

К – краплевлловлювач; Ц – центробіжний; Т – тангенціальні підвід та відвід газу; цифра після тире – діаметр апарата, мм.

Основні параметри

Концентрація рідини у газі, що надходить в апарат, л/м³, 1
Температура газу, що очищується, °С,
не більше80
Швидкість газу у вільному перерізу апарату, м/с 3,5–5,0
Гідравлічний опір, кПа,
не більше0,5
Концентрація крапельної вологи на виході із апарата, мг/м³,
не більше70

Технічна характеристика

Типорозмір апарата	Діаметр апарата, <i>D</i> , мм	Маса, кг
КЦТ-400	400	91
КЦТ-500	500	130
КЦТ-600	600	187
КЦТ-700	700	230
КЦТ-800	800	285
КЦТ-900	900	352
КЦТ-1000	1000	411
КЦТ-1200	1200	707
КЦТ-1400	1400	922
КЦТ-1600	1600	1154
КЦТ-1800	1800	1547
КЦТ-2000	2000	1851
КЦТ-2200	2200	2248
КЦТ-2400	2400	2618

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять та виконання розрахункової
частини курсової роботи з курсу
«Обладнання захисту біосфери»

для студентів усіх форм навчання спеціальності
7.(8).04010601 «Екологія та охорона навколишнього середовища»

Частина 1

ОБЛАДНАННЯ ЗАХИСТУ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ

У к л а д а ч і :
САМОЙЛЕНКО Наталія Миколаївна
АВЕРЧЕНКО Валентина Іллівна

Відповідальний за випуск проф. *Шапорев В. П.*
Роботу до видання рекомендувала проф. *Зінченко М. Г.*
В авторській редакції

План 2016, поз. 9.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять та виконання розрахункової
частини курсової роботи з курсу
«Обладнання захисту біосфери»

для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.(8).04010601 «Екологія
та охорона навколишнього середовища»

Частина 1

ОБЛАДНАННЯ ЗАХИСТУ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ

Харків
НТУ «ХП»
2016