

**ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ**

**методичні рекомендації  
до виконання практичних робіт**

Запоріжжя 2025



УДК 502/504(072)  
Т38

Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 6 від 28.02.2025 р.)

**Укладач**

Максимова Н.М., канд. техн. наук, доцент

Т38 Технології захисту атмосфери : методичні рекомендації до виконання практичних робіт / уклад. Н. М. Максимова. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025. 114 с.

У методичних рекомендаціях наведено тематику практичних робіт, критерії оцінювання, методичні пояснення щодо порядку виконання завдань та приклади їх виконання, питання для самоперевірки, список рекомендованих джерел тощо.

**УДК 502/504(072)**

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025

## ЗМІСТ

Вступ	3
Практична робота № 1. Визначення об'єму аспірації при перевантаженні сипких матеріалів на прикладі різних технологічних вузлів гірничозбагачувальних комбінатів.	
Перевантаження гарячих матеріалів	7
1.1 Загальне рівняння для розрахунку аспірації технологічного обладнання	7
1.2 Перевантаження гарячих матеріалів	8
1.2.1 Перевантаження сухих матеріалів	13
1.2.2 Приклад № 1: визначення об'єму аспірації при перевантаженні сухого повернення з конвеєру на конвеєр	13
1.2.3 Перевантаження вологих матеріалів	25
1.2.4 Приклад № 2: визначення об'єму аспірації барабанного охолоджувача повернення	28
1.3 Завдання № 1	36
1.4 Завдання № 2	37
Питання для самоперевірки	38
Перелік рекомендованих джерел	39
Зміст та вимоги до контрольних точок	39
Практична робота № 2. Визначення розмірів пилоосаджувальної камери та вибір циклону	41
2.1 Розрахунок матеріального балансу аспіраційної системи	41
2.1.1 Приклад розрахунку матеріального балансу	47
2.2 Визначення розмірів пилоосаджувальної камери	42
2.2.1 Приклад визначення розмірів пилоосаджувальної камери	47
2.3 Розрахунок пилоосаджувальної камери	48
2.3.1 Приклад розрахунку пилоосаджувальної камери	51
2.4 Розрахунок та вибір циклона	53
2.4.1 Приклад розрахунку та вибору циклону	60
2.5 Завдання № 1	66
2.6 Завдання № 2	67
Питання для самоперевірки	68
Перелік рекомендованих джерел	68
Зміст та вимоги до контрольних точок	69
Практична робота № 3. Визначення ступеню очищення газу від пилу в рукавному фільтрі	70
3.1 Теоретичні відомості	70
3.2 Приклад розрахунку рукавного фільтру	80

3.3 Завдання № 1	82
Питання для самоперевірки	83
Перелік рекомендованих джерел	83
Зміст та вимоги до контрольних точок	83
Практична робота № 4. Розрахунок скрубера Вентурі	84
4.1 Швидкісні газопромивачі	84
4.2 Методика розрахунку	86
4.3 Приклад розрахунку	89
4.4 Задача за варіантами	92
Питання для самоперевірки	93
Перелік рекомендованих джерел	93
Зміст та вимоги до контрольних точок	94
Практична робота № 5. Розрахунок сухого пластинчастого електрофільтра	95
5.1 Методика розрахунку електрофільтра	95
5.2 Приклад розрахунку	98
5.3 Задача за варіантами	104
Питання для самоперевірки	104
Перелік рекомендованих джерел	105
Зміст та вимоги до контрольних точок	105
Додаток А Приклад титульного аркушу комплекту практичних робіт, виконаних здобувачем	106
Додаток Б Розрідження в аспіраційних укриттях	107
Додаток В Методика розрахунку суми коефіцієнтів місцевих опорів	110
Додаток Г Фізичні властивості повітря при атмосферному тиску	112

## ВСТУП

У методичних рекомендаціях наведено тематика практичних робіт, методичні пояснення щодо порядку виконання, питання для самоперевірки тощо.

Рівень сформованості знань та навичок здобувача вищої освіти з освітнього компонента за виконання практичних робіт оцінюють за бальною шкалою, яка наведена в силабусі та робочій програмі.

Додаткові зауваження:

– студент може оскаржити отримані оцінки в порядку, передбаченому Положенням про організацію освітнього процесу ([Нормативні документи : Polytechnic \(metinvest.university\)](#)) та Положенням про політику та процедури врегулювання конфліктних ситуацій ([Академічні політики : Polytechnic \(metinvest.university\)](#));

– оцінки, отримані за роботу на практичних заняттях, не можуть бути відпрацьовані або покращені, окрім процедури оскарження, оцінки за інші види поточного контролю можуть бути покращені за індивідуальною домовленістю з викладачем.

### **Особливі підходи до визнання результатів навчання**

– В разі, якщо дисципліна є обов'язковою для здобувача освіти, і він засвоїв повністю або частково відповідні програмні результати навчання під час отримання освіти на попередніх або такому ж рівні, то кредити та оцінка з дисципліни може бути перезарахована в порядку, передбаченому Положенням про організацію освітнього процесу ([Нормативні документи : Polytechnic \(metinvest.university\)](#)). Консультацію з даного питання можна отримати у викладача, куратора або гаранта освітньої програми, завідувача кафедри, за якою закріплено цю дисципліну;

– В разі, якщо здобувач освіти обрав цю дисципліну як дисципліну вільного вибору, не зважаючи на той факт, чи вивчалася вона раніше, оцінка та кредити з цієї дисципліни не перезараховуються;

– В разі, якщо здобувач освіти хотів би самостійно вивчити певні курси з вивчення технологій захисту атмосфери (наприклад, Coursera, Udemu або інших платформ, в т.ч. платформ відкритих курсів вітчизняних та/або закордонних університетів), то: 1) доцільно звернутися до списку рекомендованих вебресурсів або проконсультуватися з викладачем на предмет релевантності самостійно знайденого освітнього ресурсу програмі дисципліни; 2) в разі успішності опанування такого курсу, яке підтверджується сертифікатом або іншим способом, такому здобувачу у порядку, визначеному Положенням про визнання результатів навчання, набутих у неформальній/інформальній освіті [Нормативні документи : Polytechnic \(metinvest.university\)](#), такі результати можуть бути зараховані замість оцінки з певного виду поточного контролю;

– В разі, якщо здобувач освіти реалізував певний вид наукової

роботи (тези, стаття, результативна участь у студентській олімпіаді тощо), то у порядку, визначеному Положенням про визнання результатів навчання, набутих у неформальній/інформальній освіті [Нормативні документи : Polytechnic \(metinvest.university\)](#), такі результати можуть бути зараховані замість оцінки з певного виду поточного або навіть підсумкового контролю; консультацію з питань визнання результатів неформальної та інформальної освіти можна отримати в уповноваженої особи від кафедри, яка викладає дисципліну; перелік таких осіб можна знайти за посиланням [Студентам : Polytechnic \(metinvest.university\)](#).

Як приклад оформлення пояснювальної та розрахункової частини практичних робіт слід орієнтуватись на відповідні приклади рішення, які наведені за змістом методичних рекомендацій. Титульний аркуш студентських робіт наведено наприкінці методичних вказівок в додатку А.

## Практична робота № 1

**Визначення об'єму аспірації при перевантаженні сипких матеріалів на прикладі різних технологічних вузлів гірничозбагачувальних комбінатів. Перевантаження гарячих матеріалів**

### 1.1 Загальне рівняння для розрахунку аспірації технологічного обладнання

В основу розрахункових методів визначення оптимального повітрообміну в аспіраційних укриттях технологічного обладнання покладено рівняння балансу маси: кількість повітря, яке відсмоктується з укриття, дорівнює кількості повітря, яке поступає в укриття по жолобу і через нещільності або робочі отвори [1, 4]

$$G = G_{\text{н}} + G_{\text{ж}} \quad (1.1)$$

- де  $G$  – кількість повітря, яке відсмоктується з укриття, кг/с;  
 $G_{\text{н}}$  – кількість повітря, яке поступає через нещільності або робочі отвори, кг/с;  
 $G_{\text{ж}}$  – кількість повітря, яке поступає в укриття по жолобу з матеріалом, кг/с

Кількість повітря, яке поступає через нещільності і робочі отвори, визначається величиною розрідження, яке підтримується в укритті, і загальною площею нещільностей та розраховується або по заданій (усередненій) швидкості повітря в отворах, або по заданому розрідженню в укритті

$$G_{\text{н}} = \sum_{i=1}^N \mu_i \sqrt{2\rho_0 P_i} F_{\text{н}i}, \quad (1.2)$$

- де  $N$  – кількість отворів в укритті;  
 $\mu_i$  – коефіцієнт витрати  $i$ -того отвору;  
 $\rho_0$  – щільність повітря, яке надходить через нещільності, кг/м<sup>3</sup>;  
 $P_i$  – розрідження в області  $i$ -того отвору, Н/м<sup>2</sup>;  
 $F_{\text{н}i}$  – площа  $i$ -того отвору, м<sup>2</sup>

Коефіцієнт витрати можна виразити через коефіцієнту місцевого опору

$$\mu_i = \zeta_i^{-0,5}. \quad (1.3)$$

В більшості випадків нещільності відносно гідравлічного опору

можна розглядати як отвори в тонкій стінці, для яких  $\zeta_i = 2,4$  [4].

Розбиваючи нещільності на рівновеликі за площею живого перерізу і заміряючи розрідження на внутрішній поверхні стінки укриття поблизу цих нещільностей, можна з урахуванням рівняння (1.3) визначити кількість повітря, яке просмоктується

$$G_H = 0,65 F_H \sqrt{2\rho_0 P}, \quad (1.4)$$

де  $F_H$  – загальна площа нещільностей в укритті, м<sup>2</sup>  
 $P$  – середнє розрідження в укритті, дорівнює

$$P = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{P_i} \right)^2, \text{ Н/м}^2. \quad (1.5)$$

В розрахунках середнє розрідження приймається оптимальним та визначається дослідним шляхом. Для деяких укриттів величина оптимального розрідження і площ нещільностей наводяться в довідниках [4].

Найбільшою складністю під час проєктування аспіраційних систем є визначення кількості повітря, яке поступає в укриття з матеріалом  $G_{ж}$  [1, 3-6]. Це пояснюється складністю процесу взаємодії матеріалу з повітрям, а також необхідністю врахування аеродинамічних властивостей деяких видів технологічного обладнання (молоткових і валкових дробарок, дезинтеграторів тощо), які створюють надлишковий тиск в укриттях.

## 1.2 Перевантаження гарячих матеріалів

В загальному випадку аспірації перевантажень, коли по жолобу перевантажується сипкий матеріал з температурою, відмінною від температури навколишнього середовища, спрямований потік повітря в жолобі утворюється під дією двох основних сил: сили, характеризуючої ежекційні властивості матеріалу, і теплового напору, який виникає в результаті теплообміну між матеріалом і повітрям. Відповідно, коли температура матеріалу і повітря однакові, тепловий напір дорівнює нулю. Певний випадок – перевантаження холодних матеріалів.

Теоретично ежекцію повітря матеріалом, що подається, можна пояснити за допомогою основних рівнянь механіки двокомпонентного потоку газ – тверді частки. Розглянемо це для одновимірного стаціонарного потоку.

Інтегруючи рівняння динаміки газоподібного компонента, можна записати рівняння, яке відображає закон зміни кінетичної енергії одиничного об'єму,

$$\rho_{\Gamma}^k (v_{\Gamma}^k)^2 - \rho_{\Gamma}^0 (v_{\Gamma}^0)^2 = -(P_k - P_0) - \int_0^l (\rho_0 - \rho_{\Gamma}) g \sin \beta dx - \lambda \frac{1}{D} \int_0^l \frac{|v_{\Gamma}| v_{\Gamma}}{2} \rho_{\Gamma} dx + \int_0^l s k c \frac{|v_{\Gamma} - v_{\Gamma}^0| (v_{\Gamma} - v_{\Gamma}^0)}{2} \rho_{\Gamma} dx, \quad (1.6)$$

- де  $\rho_{\Gamma}^0, \rho_{\Gamma}^k$  – щільність повітря на початку та в кінці жолоба, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v_{\Gamma}^0, v_{\Gamma}^k$  – швидкість повітря на початку та в кінці жолоба, м/с;  
 $P_0, P_k$  – тиск на початку та в кінці жолоба, Н/м<sup>2</sup>;  
 $l, D$  – довжина жолоба та його гідравлічний діаметр, м;  
 $\rho_0, \rho_{\Gamma}$  – щільність повітря в приміщенні та в жолобі, кг/м<sup>3</sup>;  
 $g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;  
 $\beta$  – кут нахилу жолоба до горизонту, град;  
 $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору жолоба;  
 $v_{\Gamma}, v_{\Gamma}^0$  – швидкість повітря і матеріалу в жолобі, м/с;  
 $s$  – об'ємна концентрація матеріалу в жолобі, м/м<sup>3</sup>;  
 $k$  – відношення площі миделева в жолобі, м/м<sup>3</sup>;  
 $c$  – коефіцієнт лобового опору частинок

Другий член правої частини рівняння (тепловий напір) характеризує Архімедові сили, обумовлені міжкомпонентним тепло- і масообміном, а останній член, умовно названий ежекційним напором, враховує сумарний аеродинамічний опір часток матеріалу, який перевантажується по жолобу.

Знак абсолютної величини в останніх двох членах рівняння (1.6) вказує на зміну напрямку дії сили опору стінок жолоба при зміні напрямку потоку повітря та ежекційного напору при русі часток матеріалу зі швидкістю, меншою за швидкість повітряного потоку. За позитивний напрямок сил і швидкостей прийнято напрямок вздовж вісі жолоба згори до низу.

Після нескладних перетворень рівняння (1.6) отримуємо

$$v_{\Gamma}^k = \frac{P_e - P_{\Gamma} + P_2 - P_1}{\sum \zeta^* \frac{|v_{\Gamma}^k|}{2} \rho_{\Gamma}^k}, \quad (1.7)$$

- де  $\sum \zeta^*$  – приведена сума коефіцієнтів місцевих опорів жолоба;  
 $P_1, P_2$  – величина розрідження у верхньому та нижньому укриттях, Н/м<sup>2</sup>;  
 $P_e$  – ежекційний напір, Н/м<sup>2</sup>, рівний

$$P_e = \int_0^l s k c \frac{|v_{\Gamma} - v_{\Gamma}^0| (v_{\Gamma} - v_{\Gamma}^0)}{2} \rho_{\Gamma} dx; \quad (1.8)$$

$P_T$  – тепловий напір, Н/м<sup>2</sup>; рівний

$$P_T = \int_0^l (\rho_0 - \rho_T) g \sin\beta \, dx. \quad (1.9)$$

Рівняння (1.7) показує, що швидкість повітря і напрямок його руху у жолобі, що не аспірується, визначається різницею опорів  $P_e - P_T$ .

При позитивній величині різниці, швидкість пароповітряної суміші позитивна, тобто напрямок потоку газу співпадає з напрямком руху матеріалу, що пересипається. Кількість повітря, яка проходить по жолобу, в цьому випадку визначається за формулою

$$G_{ж} = F \sqrt{\frac{P_e - P_T + P_2 - P_1}{\zeta_{ж}^H \frac{1}{2\rho_T^K} + \frac{1}{\rho_T^K} - \frac{(1+m_0)^2}{(1+m_K)} \frac{1}{\rho_T^0}}}, \quad (1.10)$$

де  $\zeta_{ж}^H$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів, віднесених до швидкості повітря в кінці жолоба (див. довідники) [4];

$m_0, m_K$  – вологовміст повітря на початку та в кінці жолоба, кг/кг (див. дод. Г) [4];

Коли тепловий напір більше за ежекційний, повітря поступає у верхнє укриття. Витрата його дорівнює

$$G_{ж} = F \sqrt{\frac{P_T - P_e + P_1 - P_2}{\frac{1}{\rho_T^K} - \frac{(1+m_K)^2}{(1+m_0)} (0,5\zeta_{ж}^B - 1) + \frac{1}{\rho_T^0}}}, \quad (1.11)$$

де  $\zeta_{ж}^B$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів жолоба при русі повітря догори (див. довідники, дод. В) [4];

Таким чином, кількість повітря, яка поступає в укриття по жолобу, можна розрахувати, якщо відомі тепловий та ежекційний опори.

Для рівноприскореного руху матеріалу по жолобу, що буває практично при всіх перевантаженнях гарячих матеріалів на фабриках грудкування, ежекційний опір дорівнює

$$P_e = \frac{\bar{c} \varepsilon G_T [ |v_K - v_T|^3 - |v_0 - v_T|^3 ]}{4dFa_T}, \quad (1.12)$$

де  $\bar{c}$  – усереднений по довжині жолоба коефіцієнт лобового

- опору, умовно названий приведеним коефіцієнтом опору;
- $\varepsilon$  – відношення щільності повітря до щільності матеріалу;
- $G_T$  – витрата матеріалу, кг/с;
- $v_0, v_k$  – швидкість матеріалу на початку і в кінці жолоба, м/с;
- $d$  – середній діаметр часток, м;
- $a_T$  – прискорення руху матеріалу в жолобі, м/с<sup>2</sup>

Як показали чисельні дослідження, приведений коефіцієнт лобового опору залежить від об'ємної концентрації і крупності часток. Пояснюється це впливом стисненості на гідродинамічні умови обтікання часток.

В результаті обробки дослідних даних для матеріалів, які перероблюються на фабриках гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК), при  $10^{-4} < s < 10^{-2}$  отримана емпірична залежність [4]

$$\bar{c} = 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{d \cdot 10^3} \sqrt{\bar{s} \cdot 10^3}\right), \quad (1.13)$$

- де  $\bar{s}$  – усереднена по довжині жолоба об'ємна концентрація матеріалу, яка дорівнює

$$\bar{s} = \frac{2G_T}{\rho_T F(v_0 + v_k)}, \quad (1.14)$$

- де  $\rho_T$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>

Для матеріалів поліфракційного складу середній діаметр часток розраховується за формулою

$$d = \sum_{i=1}^N y_i d_i, \quad (1.15)$$

- де  $y_i$  – масова частка часток  $i$ -ої фракції;
- $d_i$  – діаметр часток  $i$ -ої фракції, м

Швидкість матеріалу в кінці жолоба, де потік не відхиляється стінками, визначається за формулою

$$v_k = \sqrt{2gH}, \quad (1.16)$$

- де  $g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;
- $H$  – вертикальна відстань від гори привідного барабану верхнього конвеєру до входу матеріалу в нижнє

укриття, м

Матеріал, який скидається з конвеєру, зустрінеться зі стінкою (рис. 1.1) [4], якщо

$$H_1 = \frac{g\tau_1^2}{2} < H_0, \quad (1.17)$$

де  $\tau_1$  – час, необхідний для досягнення матеріалом стінки укриття при русі з горизонтальною швидкістю, яка дорівнює швидкості конвеєру, с:

$$\tau_1 = \frac{l_r}{v_{\text{конв}}},$$

де  $l_r$  – горизонтальна відстань від вісі барабану до стінки укриття, м;  
 $v_{\text{конв}}$  – швидкість верхнього конвеєра (який подає), м/с



Рисунок 1.1 – Розрахункова схема для визначення кінцевої швидкості руху матеріалів [4]

В цьому випадку для визначення коефіцієнта зменшення швидкості матеріалу в результаті зустрічі зі стінкою необхідно визначити кут повороту

$$\gamma = 180^\circ - \left( \beta_0 + \operatorname{arc\,tg} \frac{4,43\sqrt{H_1}}{v_{\text{КОНВ}}} \right), \quad (1.18)$$

де  $\beta_0$  – кут нахилу стінки

Швидкість  $v_i$  при наявності поворотів жолоба і при зустрічі потоку матеріалів зі стінкою визначаються послідовним розрахунком всіх прямолінійних ділянок за формулою

$$v_i = \sqrt{(v_{i-1}k_{ni})^2 + 2a_{\tau i} \frac{H_i}{\sin \beta_i}}, \quad (1.19)$$

де  $v_{i-1}$  – швидкість руху матеріалу в кінці попередньої ділянки жолоба або в момент зустрічі зі стінкою (в останньому випадку  $v_{i-1}$ , визначається як рівнодіюча векторів швидкості  $v_{\text{КОНВ}}$  і швидкості, набутої при вертикальному падінні на відстані  $H = H_i$ ), м/с;

$k_{ni}$  – коефіцієнт зменшення швидкості при повороті потоку на початку  $i$ -ої ділянки або при зустрічі зі стінкою;

$a_{\tau i}$  – прискорення матеріалу на  $i$ -тій ділянці жолоба;

$H_i$  – висота перепаду матеріалу на  $i$ -тій прямолінійній ділянці жолоба, м;

$\beta_i$  – кут нахилу  $i$ -тої ділянки жолоба до горизонтальної площини, град.

$$a_{\tau i} = g(1 - f_{\text{тр}} \operatorname{ctg} \beta_i) \sin \beta_i, \quad (1.20)$$

де  $f_{\text{тр}}$  – коефіцієнт тертя матеріалу, який рухається, о днище жолобу (при сталевому днищі  $f_{\text{тр}} = 0,51$ , при породній подушці  $f_{\text{тр}} = 0,7$ )

Значення  $k_{ni}$  в залежності від кута повороту наступні [4]:

Кут повороту, град	5	10	20	30	40	45
$k_{ni}$	1,0	0,97	0,93	0,85	0,75	0,69

Швидкість  $v_k$  визначається послідовним розрахунком всіх прямолінійних ділянок жолоба. Розрахункове прискорення, яке отримує матеріал, визначається за формулою

$$a_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{Ti}, \quad (1.21)$$

де  $N$  – кількість прямолінійних ділянок жолоба

Швидкість матеріалу на початку жолоба  $v_0$  визначається за формулою

$$v_0 = v_{\text{вх}} \sin \beta_1, \quad (1.22)$$

де  $v_{\text{вх}}$  – швидкість матеріалу при вході на першу ділянку жолоба, м/с;

$\beta_1$  – кут нахилу першої ділянки жолоба, град.

Величина теплового напору залежить від інтенсивності міжкомпонентного теплообміну і визначається зміною температури повітря по довжині жолоба. Для практичних розрахунків можна використовувати наступну залежність:

$$P_T = \frac{\rho_0 - \rho_y}{2} gH, \quad (1.23)$$

де  $\rho_y$  – щільність повітря, яке поступає в укриття по жолобу, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – висота перепаду матеріалу, м

Враховуючи складність розрахунків міжкомпонентного теплообміну, щільність повітря  $\rho_y$  для перевантаження гарячих матеріалів фабрик рекомендується визначати при температурі

$$t_y = k_i \frac{t_0 + t_T}{2}, \quad ^\circ\text{C} \quad (1.24)$$

де  $t_0$  – температура повітря в приміщенні,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_T$  – температура матеріалу,  $^\circ\text{C}$ ;

$k_i$  – поправочний коефіцієнт, який визначається в залежності від різниці температур ( $\Delta t = t_T - t_0$ ) за табл. 1.1 [4]

Таблиця 1.1 – Поправочний коефіцієнт  $k_i$  [4]

$\Delta t$	$k_i$	$\Delta t$	$k_i$
15 – 50	1,0	200 – 300	0,60
50 – 100	0,9	300 – 400	0,55

100 – 150	0,75
150 – 200	0,65

400 – 500	0,50
500 – 600	0,45

Слід відмітити, що дані цієї табл. 1.1 отримані на підставі дослідних замірів в умовах фабрик огрудкування [4]. Для застосування їх при розрахунку аспірації перевантажень інших виробництв необхідно провести додаткові випробування [4].

Як правило, в умовах фабрик огрудкування направлений повітряний потік в жолобах формується за схемою прямогоку. Для локалізації пиловиділення передбачається установка верхнього та нижнього аспіраційного укриття.

Продуктивність відсмоктувачів розраховується за формулами:  
- для верхнього укриття

$$G_1 = G_{B1} - G_{Ж} \frac{1+m_0}{1+m_k}, \quad (1.25)$$

- для нижнього укриття

$$G_2 = G_{H2} + G_{Ж}, \quad (1.26)$$

де  $G_1, G_2$  – продуктивність верхнього і нижнього відсмоктувачів відповідно, кг/с;  
 $G_{B1}, G_{H2}$  – кількість повітря, яка просмоктується крізь нещільності верхнього і нижнього укриття відповідно, кг/с

Порядок розрахунку.

При вихідних даних визначаються:

- за формулою (1.15) середній (умовний) діаметр матеріалу;
- за формулами (1.16) – (1.22) – швидкість матеріалу на початку і в кінці жолобу, а також прискорення  $a_T$ ;
- за формулою (1.14) об'ємна концентрація матеріалу в жолобі;
- за формулою (1.13) приведений коефіцієнт лобового опору.

Розраховується кількість повітря, яка поступає по жолобу в нижнє укриття.

Для цього визначають за формулою (1.23) тепловий напір, задаються швидкістю повітря  $v_T$  та за формулою (1.12) розраховується ежекційний напір. Потім за формулою (1.10) визначають кількість повітря, яка поступає в укриття, і розраховують справжню швидкість

$$v_H = \frac{G_T}{\rho_y F}, \quad (1.27)$$

Якщо окажется, що  $v_H$  не дорівнює раніше прийнятій швидкості  $v_T$ , виконують перерахунок, знов задаючись швидкістю, і т. д. до тих пір, доки не стане

$$\frac{v_H - v_T}{v_H} \leq 0,1.$$

За розрахункову величину приймають

$$v = \frac{v_H + v_T}{2}, \quad (1.28)$$

кількість повітря, яка поступає в укриття по жолобу, визначається за формулою

$$G_{\text{ж}} = v \rho_y F. \quad (1.29)$$

Визначають продуктивність місцевих відсмоктувачів.

Для цього за формулою (1.4) розраховують кількість повітря, яка просмоктується крізь нещільності укриття. При цьому площа нещільностей приймається за довідниками [4]. Потім за формулами (1.25) та (1.26) визначається продуктивність місцевих відсмоктувачів.

Під час розрахунків може виконатись умова, що  $G_1 < 0$ . Це значить, що для знеплення перевантаження достатньо тільки нижнього відсмоктувача. Продуктивність розраховують в тій же послідовності, однак при розрахунку кількості повітря  $G_{\text{ж}}$  слід замість формули (1.10) використовувати рівняння

$$G_{\text{ж}} = F \sqrt{\frac{P_e - P_T + P_2}{\zeta_H \frac{1}{2\rho_T^k} + \frac{1}{\rho_T^k} - \frac{(1+m_0)^2}{(1+m_k)} \frac{1}{\rho_T^0}}}, \quad (1.30)$$

де  $\zeta^H$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів з урахуванням опорів входу повітря у верхнє укриття (див. дод. В) [4]

Під час розрахунку за формулою (1.10) може виконатись умова  $P_e - P_T + P_2 - P_1 < 0$ . Це значить, що повітря в жолобі рухається догори (з нижнього укриття у верхнє). Розрахунок продуктивності місцевих відсмоктувачів виконується у тій же послідовності, однак при розрахунку повітря, яке поступає в укриття по жолобу, слід використовувати замість формули (1.10) рівняння (1.11). продуктивність місцевих відсмоктувачів розраховується за формулами:

- для верхнього укриття

$$G_1 = G_{H1} - G_{ж}, \quad (1.31)$$

- для нижнього укриття

$$G_2 = G_{H2} - G_{ж} \frac{1 + m_k}{1 + m_0}. \quad (1.32)$$

Загальний об'єм аспірації дорівнює сумі об'ємів повітря, яке просмоктується крізь нещільності верхнього та нижнього укриття, та пари, яка утворюється під час перевантаження нагрітих вологих матеріалів. Приведені розрахункові залежності дозволяють визначити перерозподіл цих об'ємів між верхнім та нижнім відсмоктувачами. Враховуючи, що вихідні дані ненадійні і що деякі з них орієнтовні (оптимальне розрідження в укриттях, площа нещільностей), при розрахунку продуктивність відсмоктувачів для гарячих матеріалів слід вводити коефіцієнти запасу: для продуктивності верхнього відсмоктувача  $k_3 = 1,2$ ; для нижнього  $k_3 = 1,1$ .

### 1.2.1 Перевантаження сухих матеріалів

Гарячі матеріали (агломерат, котуни, обпалений вапняк, обпалена руда), які перероблюються на фабриках гірничозбагачувальних комбінатів, як правило, сухі – їх вологість не перевищує 0,1 %.

Водяна пара при перевантаженні таких матеріалів практично не виділяється. Паровиділення відбувається лише при транспортуванні гарячих матеріалів після зрошення водою (в барабанних охолоджувачах і в змішувальних барабанах) або після змішування їх з холодним вологим матеріалом.

Розрахунок аспірації перевантаження сухих гарячих матеріалів дещо спрощується, оскільки не потрібно враховувати збільшення вологовмісту, внаслідок відсутності міжкомпонентного масообміну вологовміст повітря в жолобі не змінюється. Отже, в розрахункових формулах (1.10), (1.11), (1.25), (1.30), (1.32) виключається член  $\frac{1+m_k}{1+m_0} = 1$ , який враховує збільшення вологовмісту.

### 1.2.2 Приклад № 1: визначення об'єму аспірації при перевантаженні сухого повернення з конвеєру на конвеєр

Визначити об'єм аспірації при перевантаженні сухого повернення з конвеєра на конвеєр (рис. 1.2).

Вихідні дані:

- витрата повернення  $G_T = 38$  кг/с;
- гранулометричний склад повернення:

Клас, мм	20 – 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1,25	1,25 – 0,63	0,63 – 0
Вихід, %	2	31	25	24	8	10

- температура повернення  $t_T = 38^\circ \text{C}$ ;
- щільність повернення  $\rho_T = 3700 \text{ кг/м}^3$ ;
- температура повітря в приміщенні  $t_0 = 18^\circ \text{C}$ ;
- висота перепаду повітря  $H = 4,9 \text{ м}$ ;
- площа поперечного перерізу жолоба  $F = 0,36 \text{ м}^2$ ;
- ширина верхнього конвеєру  $B_K = 800 \text{ мм}$ ;
- периметр нижнього укриття в плані  $\Gamma = 10 \text{ м}$ ;
- площі нещільностей та оптимальні розрідження в укриттях для даного аспірованого вузла:  $F_{\Pi 1} = 0,96 \text{ м}^2$ ,  $P_1 = 5 \text{ Н/м}^2$ ,  $F_{\Pi 2} = 0,02 \cdot 10 = 0,2 \text{ м}^2$ ,  $P_2 = 8 \text{ Н/м}^2$ , де  $F_{\Pi}$  – площі відкритих проємів,  $\text{м}^2$ ;  $P$  – розрідження в укриттях,  $\text{Н/м}^2$ .

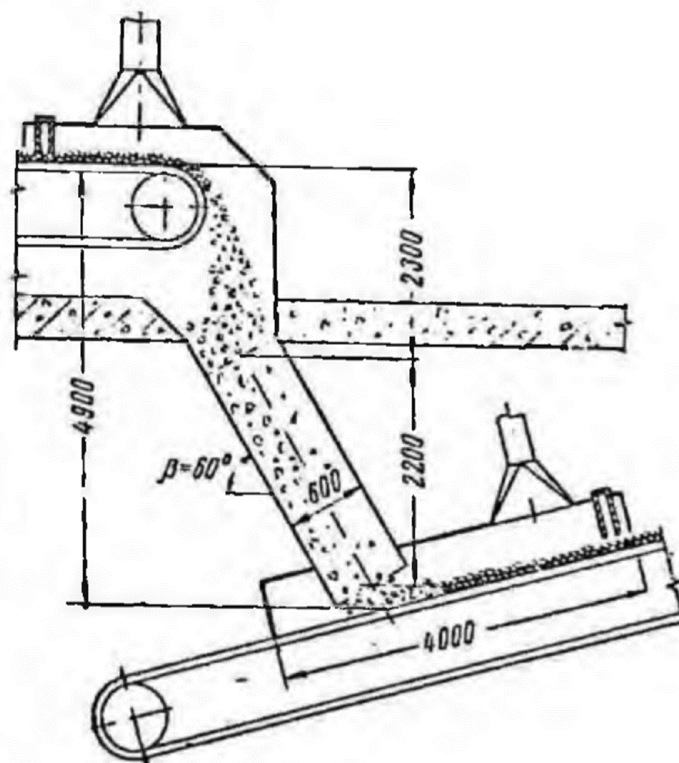


Рисунок 1.2 – Розрахункова схема для визначення об'єму аспірації при перевантаженні матеріалу з конвеєру на конвеєр [4]

Для матеріалів поліфракційного складу середній діаметр часток розраховується за формулою (1.15)

$$d = \sum_{i=1}^N y_i d_i,$$

- де  $y_i$  – масова частка часток  $i$ -ої фракції;  
 $d_i$  – діаметр часток  $i$ -ої фракції, м

$$d = 0,01 \left( \left( \frac{20+10}{2} \right) \cdot 2 + \left( \frac{10+5}{2} \right) \cdot 31 + \left( \frac{5+2,5}{2} \right) \cdot 25 + \left( \frac{2,5+1,25}{2} \right) \cdot 24 + \left( \frac{1,25+0,63}{2} \right) \cdot 8 + \left( \frac{0,63+0}{2} \right) \cdot 10 \right) = 0,01(15 \cdot 2 + 7,5 \cdot 31 + 3,75 \cdot 25 + 1,88 \cdot 24 + 0,99 \cdot 8 + 0,315 \cdot 10) = 4,1 \text{ мм} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Швидкість матеріалу на початку жолоба  $v_0$  визначається за формулою (1.22)

$$v_0 = v_{\text{вх}} \sin \beta_1,$$

де  $v_{\text{вх}}$  – швидкість матеріалу при вході на першу ділянку жолоба, м/с;  
 $\beta_1$  – кут нахилу першої ділянки жолоба, град.

В даному розрахунковому випадку ( $H = 2,3$  м,  $\beta_1 = 60^\circ$ , див. рис. 1.2) отримуємо

$$v_0 = v_{\text{вх}} \sin \beta_1 = \sqrt{2gH} \sin \beta_1 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2,3} \sin 60^\circ = 5,8 \text{ м/с};$$

Розрахункове прискорення, яке отримує матеріал, визначається за формулою (1.20)

$$a_{\text{т}} = g(1 - f_{\text{тр}} \operatorname{ctg} \beta_i) \sin \beta_i =, \\ = 9,8(1 - 0,51 \operatorname{ctg} 60^\circ) \sin 60^\circ = 6,0 \text{ м/с}^2$$

де  $f_{\text{тр}}$  – коефіцієнт тертя матеріалу, який рухається, о днище жолобу (при сталевому днищі  $f_{\text{тр}} = 0,51$ , при породній подушці  $f_{\text{тр}} = 0,7$ ). В даному випадку  $f_{\text{тр}} = 0,51$ .

Швидкість  $v_i$  при наявності поворотів жолоба і при зустрічі потоку матеріалів зі стінкою визначаються послідовним розрахунком всіх прямолінійних ділянок за формулою (1.19)

$$v_i = \sqrt{(v_{i-1} k_{ni})^2 + 2a_{\text{т}i} \frac{H_i}{\sin \beta_i}},$$

В даному (ділянка прямолінійна, тому коефіцієнт зменшення швидкості при повороті потоку на початку  $i$ -ої ділянки або при зустрічі зі стінкою  $k_{ni} = 1$ ; висота перепаду матеріалу на  $i$ -тій прямолінійній ділянці

жолоба  $H_i = 2,2$  м (див. рис. 1.2)) випадку маємо

$$v_k = \sqrt{(v_0)^2 + 2a_{Ti} \frac{H_i}{\sin \beta_i}} = \sqrt{(5,8)^2 + 2 \cdot 6,0 \cdot \frac{2,2}{\sin 60^\circ}} = 8,0 \text{ м/с}$$

Визначаємо емпіричну залежність (1.14) [4]

$$\bar{s} = \frac{2G_T}{\rho_T F(v_0 + v_k)} = \frac{2 \cdot 38}{3700 \cdot 0,36 \cdot (5,8 + 8,0)} = 0,00413 = 4,1 \cdot 10^{-3};$$

Перевіряємо виконання умови [4]

$$10^{-4} < s < 10^{-2}$$

$$10^{-4} < 4,1 \cdot 10^{-3} < 10^{-2}$$

Визначаємо емпіричну залежність (1.13) [4]

$$\begin{aligned} \bar{c} &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{d \cdot 10^3} \sqrt{\bar{s} \cdot 10^3}\right) = \\ &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3} \sqrt{4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3}\right) = \\ &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{4,1} \sqrt{4,1}\right) = \\ &= 1,8 e^{\left(-\frac{2,3}{4,1} \sqrt{4,1}\right)} = 1,8 \cdot 0,321 = 0,578 = 0,6. \end{aligned}$$

1. Визначаємо кількість повітря, яка надходить по жолобу до нижнього укриття.

Розраховуємо тепловий напір  $[\rho_0 = 1,213 \text{ кг/м}^3 \text{ при } t_0 = 18^\circ\text{C}; \rho_y = 1,083 \text{ кг/м}^3 \text{ при температурі за формулою (1.24)}$

$$t_y = k_i \frac{t_0 + t_T}{2} = 0,9 \frac{18 + 100}{2} = 53^\circ\text{C}$$

де  $t_0 = 18^\circ\text{C}$  – температура повітря в приміщенні,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_T = 100^\circ\text{C}$  – температура матеріалу,  $^\circ\text{C}$  (прийнята);

$k_i$  – поправочний коефіцієнт, який визначається в залежності від різниці температур ( $\Delta t = t_T - t_0 = 100 - 18 = 82$ ) за табл. 1.1, звідки  $k_i = 0,9$  [4]

За дод. Г [4] отримуємо:

Температура, °C	Парціальний тиск водяної пари, мм рт. ст.	Щільність повітря, кг/м <sup>3</sup>		Вологовміст насиченого повітря, г/кг	Тепловміст насиченого повітря, кДж/кг
		сухого	насиченого		
53	107,2	1,083	1,025	102,2	319

Величина теплового напору залежить від інтенсивності міжкомпонентного теплообміну і визначається зміною температури повітря по довжині жолоба. Для практичних розрахунків можна використовувати наступну залежність (1.23):

$$P_T = \frac{\rho_0 - \rho_y}{2} gH,$$

де  $\rho_y$  – щільність повітря, яке поступає в укриття по жолобу, кг/м<sup>3</sup>;

$H = 4,9$  м – висота перепаду матеріалу (див. рис. 1.2), м

$$P_T = \frac{\rho_0 - \rho_y}{2} gH = \frac{1,213 - 1,083}{2} 9,8 \cdot 4,9 = 3,1 \text{ Н/м}^2.$$

Сума коефіцієнтів місцевих опорів (див. довідники, дод. В) [4] дорівнює

$$\zeta_{\text{ж}}^H = 0,3 + 0,3 + 1,05 = 1,65.$$

Примітка. За даними довідників (дод. В) [4] обираємо:

- вхід повітря з укриття в жолоб: при русі повітря вниз  $\zeta'_{\text{ін}} = 0,3$ ;

- вихід повітря з жолоба в укриття: при русі повітря вниз  $\zeta'_{\text{ін}} = 1,05$ .

Оскільки напрямок потоку газу співпадає з напрямком руху матеріалу, що пересипається, то кількість повітря, яка проходить по жолобу (площею поперечного перерізу  $F = 0,36$  м<sup>2</sup> (див. вихідні дані)), в визначається за формулою (1.10) з урахуванням спрощення (для аспірації перевантаження сухих гарячих матеріалів  $\frac{1+m_k}{1+m_0} = 1$ , оскільки не враховується збільшення вологовмісту)

$$G_{\text{ж}} = F \sqrt{\frac{P_e - P_T + P_2 - P_1}{\zeta_{\text{ж}}^H \frac{1}{2\rho_{\Gamma}^k} + \frac{1}{\rho_{\Gamma}^k} - \frac{1}{\rho_{\Gamma}^0}}}$$

де  $\zeta_{\text{ж}}^H$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів, віднесених до швидкості повітря в кінці жолоба (див. довідники) [4];

$m_0, m_k$  – вологовміст повітря на початку та в кінці жолоба, кг/кг

(див. додаток Г) [4];

$$G_{\text{ж}} = 0,36 \sqrt{\frac{P_e - 3,1 + 8 - 5}{1,65 \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,083} + \frac{1}{1,083} - \frac{1}{1,213}}} = 0,36 \sqrt{\frac{P_e - 0,1}{0,76 + 0,92 - 0,82}} =$$

$$= 0,36 \sqrt{\frac{P_e - 0,1}{0,86}} = 0,36 \frac{\sqrt{P_e - 0,1}}{\sqrt{0,86}} = 0,36 \frac{\sqrt{P_e - 0,1}}{0,93} = 0,39 \sqrt{P_e - 0,1} \text{ кг/с.}$$

З урахуванням формул (1.27) та (1.12) визначаємо  
- справжня швидкість

$$v_{\Gamma} = \frac{G_{\text{ж}}}{\rho_{\gamma} F} = \frac{0,39 \sqrt{P_e - 0,1}}{1,083 \cdot 0,36} = \frac{0,39 \sqrt{P_e - 0,1}}{0,39} = \sqrt{P_e - 0,1} \text{ м/с} \quad (\text{A})$$

- ежекційний опір

$$P_e = \frac{\bar{c} \varepsilon G_{\Gamma} [ |v_{\kappa} - v_{\Gamma}|^3 - |v_0 - v_{\Gamma}|^3 ]}{\rho_{\Gamma} 4 d F a_{\Gamma}} = \quad (\text{B})$$

$$= \frac{0,6 \cdot 1,083 \cdot 38 \cdot [ |8 - v_{\Gamma}|^3 - |5,8 - v_{\Gamma}|^3 ]}{3700 \cdot 4 \cdot (4,1 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,36 \cdot 6} =$$

$$= \frac{24,692 \cdot [ |8 - v_{\Gamma}|^3 - |5,8 - v_{\Gamma}|^3 ]}{129,5} = 0,189 [ |8 - v_{\Gamma}|^3 - |5,8 - v_{\Gamma}|^3 ] \text{ Н/м}^3.$$

Вирішуючи методом послідовних наближень (бажано використовувати Excel) спільно рівняння (A) та (B), знаходимо розрахункову швидкість повітря, яке поступає по жолобу в нижнє укриття  $v = 3,73 \text{ м/с}$  та його витрату.

$P_e$ підставляється	$v_{\Gamma} = \sqrt{P_e - 0,1}$ визначається	$P_e = 0,189 [  8 - v_{\Gamma} ^3 -  5,8 - v_{\Gamma} ^3 ]$ визначається	Примітка
1	0,95	44,66	
2	1,38	38,51	
3	1,7	34,23	
4	1,97	30,82	
5	2,21	27,94	
6	2,43	25,43	
7	2,63	23,25	
8	2,81	21,37	
9	2,98	19,67	
10	3,15	18,04	
11	3,3	16,67	
12	3,45	15,35	
13	3,59	14,17	
14	<b>3,73</b>	13,04	Приймається

Кількість повітря, яка поступає в укриття по жолобу, визначається за формулою

$$G_{\text{ж}} = v\rho_y F = 3,73 \cdot 1,083 \cdot 0,36 = 1,45 \text{ кг/с.}$$

2. Визначаємо продуктивність відсмоктувачів.  
За формулою (1.4) знаходимо

$$G_{\text{н}} = 0,65 F_{\text{н}} \sqrt{2\rho_0 P},$$

де  $F_{\text{н}}$  – загальна площа нещільностей в укритті, м<sup>2</sup>  
 $P$  – середнє розрідження в укритті, дорівнює

$$G_{\text{н1}} = 0,65 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,213 \cdot 5} = 2,17 \text{ кг/с;}$$

$$G_{\text{н2}} = 0,65 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,213 \cdot 8} = 0,57 \text{ кг/с.}$$

Тоді продуктивність відсмоктувачів з урахуванням коефіцієнтів запасу (для продуктивності верхнього відсмоктувача  $k_3 = 1,2$ ; для нижнього  $k_3 = 1,1$ ) дорівнює

- для верхнього

$$G_1 = (G_{\text{н1}} - G_{\text{ж}})k_3 = (2,17 - 1,45) \cdot 1,2 = 0,86 \text{ кг/с;}$$

- для нижнього

$$G_2 = (G_{\text{н2}} + G_{\text{ж}})k_3 = (0,57 + 1,45) \cdot 1,1 = 2,22 \text{ кг/с.}$$

Для ненагрітого повернення розрахунок набагато спрощується ( $\rho_y = \rho_0 = 1,213 \text{ кг/м}^3$ ;  $P_T = 0$ ).

Враховуючи, що потрібен лише один (нижній) відсмоктувач, слід визначити суму коефіцієнтів місцевих опорів з урахуванням опорів входу повітря у верхнє укриття (див. дод. В) [4].

Примітка. За даними довідників (дод. В) [4] обираємо:

- вхід повітря з укриття в жолоб: при русі повітря вниз  $\zeta'_{\text{ін}} = 0,3$ ;

- вихід повітря з жолоба в укриття: при русі повітря вниз  $\zeta'_{\text{ін}} = 1,05$ .

Сума коефіцієнтів місцевих опорів (див. довідники, дод. В) [4] дорівнює

$$\zeta_{\text{ж}}^{\text{н}} = 0,3 + 0,3 + 1,05 = 1,65.$$

При русі повітря по жолобу з верхнього укриття в нижнє сума коефіцієнтів місцевих опорів (к.м.о.) розраховується за формулою:

- при відсмоктуванні лише з нижнього укриття

$$\zeta^H = \sum_{i=1}^N \zeta_{iH} + 2,4 \left( \frac{F}{F_{H1}} \right)^2 = 1,65 + 2,4 \cdot \left( \frac{0,36}{0,96} \right)^2 = 1,9875 = 2,0$$

де  $F$  – площа перерізу жолоба в світлі нормально до поздовжньої вісі його в місці входу матеріалу в укриття, м<sup>2</sup> (див. дод. В) [4];

$F_{H1}$  – площа нещільностей верхнього укриття, м<sup>2</sup>

Враховуючи, що потрібен лише один (нижній) відсмоктувач, за формулою (1.30) визначаємо

$$G_{ж} = F \sqrt{\frac{P_e + P_1}{\zeta^H \frac{1}{2\rho_0}}}$$

де  $\zeta^H$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів з урахуванням опорів входу повітря у верхнє укриття (див. дод. В) [4]

$$\begin{aligned} G_{ж} &= F \sqrt{\frac{P_e + P_1}{\zeta^H \frac{1}{2\rho_0}}} = 0,36 \cdot \sqrt{\frac{P_e + 8}{2,0 \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,213}}} = 0,36 \cdot \sqrt{\frac{P_e + 8}{1,213}} = 0,36 \cdot \sqrt{\frac{P_e + 8}{0,824}} = \\ &= 0,36 \cdot \frac{\sqrt{P_e + 8}}{\sqrt{0,824}} = \frac{0,36}{0,91} \cdot \sqrt{P_e + 8} = 0,396 \sqrt{P_e + 8} = 0,4 \sqrt{P_e + 8}. \end{aligned}$$

Звідки справжня швидкість

$$v_{\Gamma} = \frac{G_{ж}}{\rho_y F} = \frac{0,4 \sqrt{P_e + 8}}{1,213 \cdot 0,36} = \frac{0,4 \sqrt{P_e + 8}}{0,43} = 0,92 \sqrt{P_e + 8} \text{ м/с,} \quad (C)$$

де ежекційний опір

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{\bar{c}\varepsilon G_{\Gamma} [ |v_{\kappa} - v_{\Gamma}|^3 - |v_0 - v_{\Gamma}|^3 ]}{\rho_{\Gamma} 4dF a_{\Gamma}} = \\ &= \frac{0,6 \cdot 1,213 \cdot 38 \cdot [ |8 - v_{\Gamma}|^3 - |5,8 - v_{\Gamma}|^3 ]}{3700 \cdot 4 \cdot (4,1 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,36 \cdot 6} = \end{aligned} \quad (D)$$

$$= \frac{27,656 \cdot [|8 - v_r|^3 - |5,8 - v_r|^3]}{129,5} = 0,2[|8 - v_r|^3 - |5,8 - v_r|^3] \text{ Н/м}^3.$$

Розраховуючи сумісно рівняння (С) та (D), знаходимо розрахункове значення швидкості ( $v_r = 4,0$  м/с) (бажано використовувати *Excel*) та витрату повітря, що поступає по жолобу в нижнє укриття, з урахуванням формули (1.29)

$$G_{ж} = v \rho_y F = 4,0 \cdot 1,213 \cdot 0,36 = 1,75 \text{ кг/с.}$$

$P_e$ підставляється	$v_r = 0,92\sqrt{P_e + 8}$ визначається	$P_e = 0,2[ 8 - v_r ^3 -  5,8 - v_r ^3]$ визначається	Примітка
1	2,76	23,16	
2	2,91	21,55	
3	3,05	20,1	
4	3,19	18,7	
5	3,32	17,45	
6	3,44	16,34	
7	3,56	15,26	
8	3,68	14,22	
9	3,79	13,3	
10	3,9	12,41	
11	4,01	11,56	Приймається
12	4,11	10,81	
13	4,22	10,01	
14	4,32	9,32	
15	4,41	8,72	

Продуктивність нижнього відсмоктувача складе

$$G_2 = G_{H2} + G_{ж} = 0,57 + 1,75 = 2,32 \text{ кг/с.}$$

Промислові досліді місцевих відсмоктувачів на перевантаженнях гарячих матеріалів агломераційних фабрик показали, що розрахункові заведеною методикою об'єми аспірації задовільно співпадають з даними експериментальних замірів. Відносна похибка не перевищує  $\pm 15\%$ .

### 1.2.3 Перевантаження вологих матеріалів

Вплив масообміну під час перевантаження вологих матеріалів з об'єму аспірації можна відслідкувати на прикладі розрахунку аспірації барабанних охолоджувачів.

Процес охолодження матеріалу в барабанних охолоджувачах супроводжується інтенсивним виділенням пари, яка проникає разом з пилом через нещільності та отвори в робочі приміщення. Для локалізації шкідливостей, які виділяються, в практиці застосовуються ємкі укриття з різною схемою установки місцевих відсмоктувачів [4].

Аспірацію барабанних охолоджувачів можна розглядати як окремий випадок аспірації перевантаження гарячого матеріалу у велику ємність,

де в результаті тепло- та масообміну відбувається ще й інтенсивне виділення водяної пари.

Тому визначити оптимальний об'єм суміші, який відсмоктується, можна за наведеною вище методикою (див. п. 1.1-1.2), розглядаючи ємність барабану як нижнє укриття завантажувального або як верхнє укриття розвантажувального жолобу [4]. До необхідних об'ємів аспірації в цьому випадку додається об'єм пари, яка виділяється.

Розраховуємо об'єм повітрообміну в барабані на основі рівняння теплового балансу

$$G_T I_T + G_B I_B \pm \frac{G_1 I_1}{1+m_1} + G_H I_H \pm = G'_T I'_T + \frac{G_6 I_6}{1+m_6} \pm \frac{G_2 I_2}{1+m_2} + Q_T, \quad (1.33)$$

та рівняння масового балансу для сухої частини повітря

$$\frac{G_H}{1+m_H} \pm \frac{G_1}{1+m_1} = \frac{G_6}{1+m_6} \pm \frac{G_2}{1+m_2}, \quad (1.34)$$

- де  $G_T, G'_T$  – витрата матеріалу, завантаженого в барабан та вивантаженого з нього, кг/с;
- $G_B$  – витрата води, яка подається в барабан, кг/с;
- $G_1, G_2$  – витрата пароповітряної суміші в кінці завантажувального та на початку розвантажувального жолоба, кг/с;
- $G_6, G_H$  – витрата суміші, яка аспірується з барабану і просмоктується крізь нещільності, кг/с;
- $I_T, I'_T$  – тепловміст матеріалу, який поступає в барабан та вивантажується з нього, кДж/кг;
- $I_B$  – тепловміст води, яка поступає в барабан, кДж/кг;
- $I_1, I_2$  – тепловміст пароповітряної суміші в кінці завантажувального жолоба та на початку розвантажувального, кДж/кг;
- $I_6, I_H$  – тепловміст аспірованої суміші та суміші, яка просмоктується крізь нещільності, кДж/кг;
- $m_1, m_2$  – вологовміст пароповітряної суміші в кінці завантажувального та на початку розвантажувального жолобів, кг/кг;
- $m_H, m_6$  – вологовміст суміші, яка просмоктується в барабан через нещільності та аспірованої з барабану, кг/кг;
- $Q_T$  – тепловтрати крізь стінки барабану та його укриття, кДж/с

Знак плюс відповідає прямотоку (напрям руху пароповітряної суміші та матеріалу в жолобах співпадають), а знак мінус – протитоку (суміш рухається назустріч матеріалу, який перевантажується).

Аналіз рівняння (1.33) показав, що практично кількість тепла, яка вноситься у барабан матеріалом, набагато вище за тепло, яке поступає з повітрям та водою, які просмоктуються. Нехтуючи втратами тепла в навколишнє середовище, рівняння теплового балансу при прямотоці (що має місце в більшості випадків) приймає вид

$$G_T(I_T - I'_T) = G_1(I_6 - I_1) + G_H I_6 \quad (1.35)$$

Звідки

$$I_6 = \frac{G_T(I_T - I'_T) + G_1 I_1}{G_1 + G_H} \quad (1.36)$$

Розрахунок об'ємів аспірації складається з:

- визначення тепловмісту  $I_1$  та кількості повітря  $G_1$ , яке поступає по завантажувальному жолобу в барабан;

- визначення кількості повітря  $G_H$ , яке просмоктується крізь нещільності в барабан;

- розрахунку за формулою (1.36) тепловміст  $I_6$  пароповітряної суміші, яка уходить по розвантажувальному жолобу і в місцевий відсмоктувач барабану. Так як пароповітряна суміш, яка видаляється, насичена, температуру і вологовміст її  $t_6$  та  $m_6$  слід приймати за таблицями дод. Г [4];

- розрахунку кількості пароповітряної суміші  $G_2$ , яка уходить по розвантажувальному жолобу в нижнє укриття;

- визначення кількості пароповітряної суміші, яка відсмоктується від барабану,

$$G_6 = (G_1 + G_H)(1 + m_6) - G_2. \quad (1.37)$$

### 1.2.4 Приклад № 2: визначення об'єму аспірації барабанного охолоджувача повернення

Визначити об'єм аспірації барабанного охолоджувача повернення (рис. 1.3) [4].

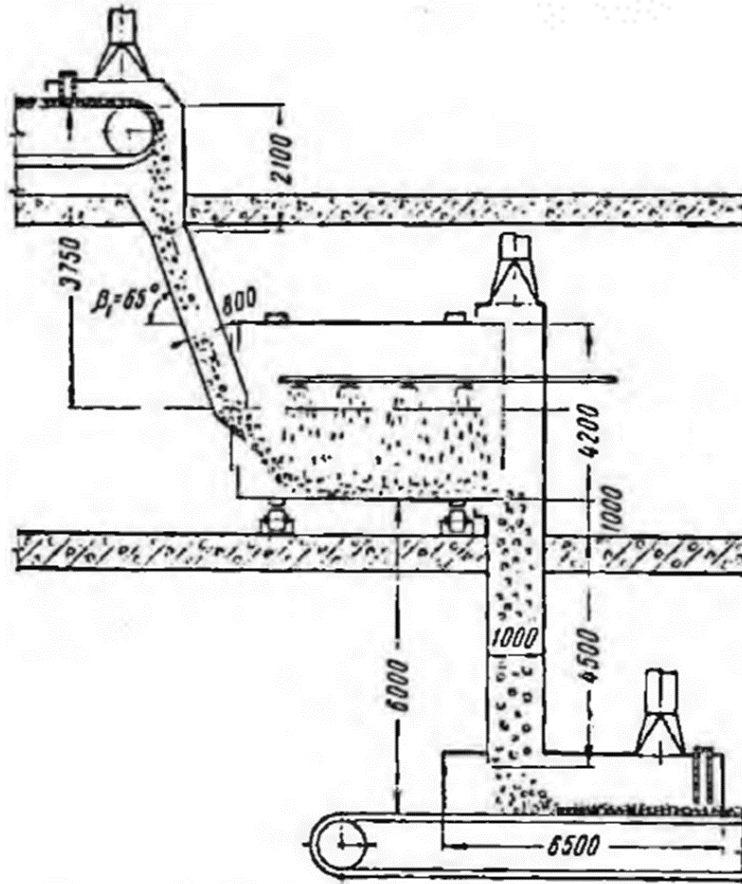


Рисунок 1.3 – Розрахункова схема для визначення об'єму аспірації при перевантаженнях, прилеглих до барабанного охолоджувача [4]

Вихідні дані:

- витрата матеріалу  $G_T = 83,5$  кг/с;
- гранулометричний склад повернення такий же, як в прикладі 1 (п.п. 1.2.2);

Клас, мм	20 – 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1,25	1,25 – 0,63	0,63 – 0
Вихід, %	2	31	25	24	8	10

- температура повернення до охолодження в барабані  $t_T = 450^\circ \text{C}$ , після охолодження  $t'_T = 100^\circ \text{C}$ ,
- щільність повернення  $\rho_T = 4100$  кг/м<sup>3</sup>;
- температура повітря в приміщенні  $t_0 = 18^\circ \text{C}$ ;
- висота перепаду матеріалу з пластинчастого живильника в барабан  $H_1 = 3,75$  м та з барабану на конвеєр  $H_2 = 6$  м;
- кут нахилу верхнього жолоба  $\beta_1 = 65^\circ$ , нижнього –  $\beta_2 = 90^\circ$ ;

- площа поперечного перерізу верхнього жолоба  $F_1 = 0,8 \text{ м}^2$ , нижнього –  $F_2 = 1 \text{ м}^2$ ;
- площі нещільностей та оптимальні розрідження в укриттях (див. довідники, дод. Б) [4]:
  - привідного барабану пластинчастого живильника  $F_{H1} = 1,4 \text{ м}^2$ ,  $P_1 = 5 \text{ Н/м}^2$ ;
  - барабанного охолоджувача  $F_H = 0,5 \text{ м}^2$ ,  $P_6 = 15 \text{ Н/м}^2$ ;
  - башмака розвантажувального жолоба  $F_{H2} = 0,3 \text{ м}^2$ ,  $P_2 = 8 \text{ Н/м}^2$ ;
- середній діаметр часток повернення  $d = 4,1 \text{ мм}$  (див. приклад № 1, п.п. 1.2.2);

### Рішення

Прискорення та швидкість матеріалу на початку і в кінці завантажувального жолоба ( $\beta_1 = 65^\circ$ , див. вихідні дані;  $H = 2,1 \text{ м}$ , див. рис. 1.3) з урахуванням формули (1.22):

- швидкість матеріалу на початку завантажувального жолоба

$$v'_0 = v_{\text{вх}} \sin \beta_1 = \sqrt{2gH} \sin \beta_1 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2,1} \sin 65^\circ = 5,8 \text{ м/с};$$

- прискорення, яке отримує матеріал, визначається за формулою (1.20)

$$a'_T = g(1 - f_{\text{тр}} \operatorname{ctg} \beta_i) \sin \beta_i = 9,8(1 - 0,51 \operatorname{ctg} 65^\circ) \sin 65^\circ = 6,75 \text{ м/с}^2;$$

- швидкість матеріалу в кінці завантажувального жолоба (висота перепаду матеріалу на  $i$ -тій прямолінійній ділянці жолоба  $H_i = 1,65 \text{ м}$  за розрахунковою схемою рис. 1.3) за формулою (1.19)

$$v'_K = \sqrt{(v_0)^2 + 2a_{Ti} \frac{H_i}{\sin \beta_i}} = \sqrt{(5,8)^2 + 2 \cdot 6,75 \cdot \frac{1,65}{\sin 65^\circ}} = 7,6 \text{ м/с}$$

Прискорення та швидкість матеріалів на початку і в кінці розвантажувального жолоба ( $\beta_2 = 90^\circ$ , див. вихідні дані;  $H = 1,0 \text{ м}$ , див. рис. 1.3):

- швидкість матеріалу на початку розвантажувального жолоба

$$v''_0 = v_{\text{вх}} \sin \beta_1 = \sqrt{2gH} \sin \beta_1 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,0} \sin 90^\circ = 4,4 \text{ м/с};$$

- прискорення, яке отримує матеріал, визначається за формулою (1.20)

$$a''_T = g = 9,8 \text{ м/с}^2;$$

Примітка.  $\text{ctg}(90^\circ) = 0$ , тому враховується лише прискорення сили тяжіння  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;

- швидкість матеріалу в кінці завантажувального жолоба (висота перепаду матеріалу на  $i$ -тій прямолінійній ділянці жолоба  $H_i = 4,5 \text{ м}$  за розрахунковою схемою рис. 1.3) за формулою (1.19)

$$v''_k = \sqrt{(v_0)^2 + 2a_{Ti} \frac{H_i}{\sin \beta_i}} = \sqrt{(4,4)^2 + 2 \cdot 9,8 \cdot \frac{4,5}{\sin 90^\circ}} = 10,4 \text{ м/с}$$

Усереднена об'ємна концентрація матеріалу за формулою (1.14):

- у завантажувальному жолобі

$$\bar{s}' = \frac{2G_T}{\rho_T F (v_0 + v_k)} = \frac{2 \cdot 83,5}{4100 \cdot 0,8 \cdot (5,8 + 7,6)} = 3,8 \cdot 10^{-3}$$

$$10^{-4} < 3,8 \cdot 10^{-3} < 10^{-2}$$

- у розвантажувальному жолобі

$$\bar{s}'' = \frac{2G_T}{\rho_T F (v_0 + v_k)} = \frac{2 \cdot 83,5}{4100 \cdot 1,0 \cdot (4,4 + 10,4)} = 2,75 \cdot 10^{-3}$$

$$10^{-4} < 2,75 \cdot 10^{-3} < 10^{-2}$$

Приведений коефіцієнт лобового опору часток повернення за формулою (1.13):

- у завантажувальному жолобі

$$\begin{aligned} \bar{c}' &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{d \cdot 10^3} \sqrt{\bar{s} \cdot 10^3}\right) = \\ &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3} \sqrt{3,8 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3}\right) = \\ &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{4,1} \sqrt{3,8}\right) = \\ &= 1,8 e^{\left(-\frac{2,3}{4,1} \sqrt{3,8}\right)} = 1,8 \cdot 0,335 = 0,603 = 0,60. \end{aligned}$$

- у розвантажувальному жолобі

$$\begin{aligned} \bar{c}'' &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{d \cdot 10^3} \sqrt{\bar{s} \cdot 10^3}\right) = \\ &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3} \sqrt{2,75 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3}\right) = \\ &= 1,8 \exp\left(-\frac{2,3}{4,1} \sqrt{2,75}\right) = \\ &= 1,8 e^{\left(-\frac{2,3}{4,1} \sqrt{2,75}\right)} = 1,8 \cdot 0,394 = 0,710 = 0,71. \end{aligned}$$

Сума коефіцієнтів місцевих опорів (див. довідники, дод. В) [4]:  
- для завантажувального жолоба

$$\zeta'_{\text{ж}} = 0,3 + 0,3 + 1,05 = 1,65$$

- для розвантажувального жолоба

$$\zeta''_{\text{ж}} = 0,3 + 1,05 = 1,35.$$

Примітка. За даними довідників (дод. В) [4] обираємо:

- вхід повітря з укриття в жолоб: при русі повітря вниз  $\zeta'_{\text{ін}} = 0,3$ ;
- вихід повітря з жолоба в укриття: при русі повітря вниз  $\zeta'_{\text{ін}} = 1,05$ .

1. Визначаємо кількість повітря  $G_1$ , яке надходить по завантажувальному жолобу у барабанний охолоджувач.

Для цього розраховуємо:

- температуру повітря, яке надходить по жолобу у барабан, визначають за формулою (1.24)

$$t'_y = k_i \frac{t_0 + t_T}{2} = 0,5 \frac{450 + 18}{2} = 117^\circ \text{C};$$

Примітка. Поправочний коефіцієнт, який визначається в залежності від різниці температур ( $\Delta t = t_T - t_0 = 450 - 18 = 432^\circ \text{C}$ ) за табл. 1.1, звідки  $k_i = 0,5$  [4].

- тепловий напір ( $\rho'_y = 0,905 \text{ кг/м}^3$  при  $t'_y = 117^\circ \text{C}$ ;  $\rho'_0 = 1,213 \text{ кг/м}^3$  при  $t'_0 = 18^\circ \text{C}$ ) визначається за формулою (1.23)

$$P'_T = \frac{\rho_0 - \rho_y}{2} gH = \frac{1,213 - 0,905}{2} 9,8 \cdot 3,75 = 5,6 \text{ Н/м}^2.$$

Примітка. За дод. Г [4] отримуємо:

Температура, °C	Парціальний тиск водяної пари, мм рт. ст.	Щільність повітря, кг/м <sup>3</sup>		Вологовміст насиченого повітря, г/кг	Тепловміст насиченого повітря, кДж/кг
		сухого	насиченого		
18	15,47	1,213	1,204	12,93	50,7
100	760,0	0,947	0,588	-	-
117		x = 0,905			
120		0,898			

При  $t'_y = 117^\circ\text{C}$  отримуємо методом інтерполяції значення щільності сухого повітря:

$$\begin{aligned}
 120^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C} &= 20^\circ\text{C} & 0,898 \text{ кг/м}^3 - 0,947 \text{ кг/м}^3 &= -0,049 \text{ кг/м}^3, \\
 117^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C} &= 17^\circ\text{C} & x' &, \\
 \text{тоді: } x' &= (-0,049 / 20) \cdot 17 = -0,04165, \\
 100^\circ\text{C} + 17^\circ\text{C} &= 117^\circ\text{C} & x &= 0,947 + x' = 0,947 + (-0,04165) = 0,905 \text{ кг/м}^3
 \end{aligned}$$

- ежекційний напір з урахуванням формули (1.12)

$$\begin{aligned}
 P'_e &= \frac{\bar{c}' \varepsilon G_T [ |v'_k - v'_r|^3 - |v'_0 - v'_r|^3 ]}{4dF_1 a'_T} = \\
 &= \frac{\bar{c}' \rho'_y G_T [ |v'_k - v'_r|^3 - |v'_0 - v'_r|^3 ]}{\rho_T 4dF_1 a'_T} = \quad (A) \\
 &= \frac{0,6 \cdot 0,905 \cdot 83,5 [ |7,6 - v'_r|^3 - |5,8 - v'_r|^3 ]}{4100 \cdot 4 \cdot 0,0041 \cdot 0,8 \cdot 6,75} = \\
 &= 0,125 \cdot [ |7,6 - v'_r|^3 - |5,8 - v'_r|^3 ], \text{ Н/м}^2;
 \end{aligned}$$

- швидкість повітря в жолобі (при  $m_0 = m_H$  – масообмін в завантажувальному жолобі відсутній) з урахуванням формули (1.27) та формули (1.10)

$$\begin{aligned}
 v'_r &= \frac{G_{ж}}{\rho_y F} = \frac{F_1}{\rho_y F_1} \sqrt{\frac{P_e - P_T + P_6 - P_1}{\zeta'_{ж2} \frac{1}{2 \rho'_y} + \frac{1}{\rho'_y} - \frac{1}{\rho'_0}}} = \frac{0,8}{0,905 \cdot 0,8} \sqrt{\frac{P_e - 5,6 + 15 - 5}{1,65 \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,905} + \frac{1}{0,905} - \frac{1}{1,213}}} = \\
 &= \sqrt{P_e + 4,4} \text{ м/с.} \quad (B)
 \end{aligned}$$

Вирішуючи методом послідовних наближень (бажано використовувати Excel) спільно рівняння (A) та (B), знаходимо розрахункову швидкість повітря, яке поступає у барабан  $v = 3,44$  м/с та витрату повітря з урахуванням формули (1.29)

$$G'_1 = v'_r \rho'_y F_1 = 3,44 \cdot 0,905 \cdot 0,8 = 2,491 = 2,5 \text{ кг/с.}$$

$P_e$	$v'_r = \sqrt{P_e + 4,4}$	$P'_e = 0,125 \cdot [ 7,6 - v'_r ^3 -  5,8 - v'_r ^3]$	Примітка
підставляється	визначається	визначається	
1	2,32	13,13	
2	2,53	11,92	
3	2,72	10,87	
4	2,9	9,93	
5	3,07	9,08	
6	3,22	8,36	
7	3,38	7,62	
7,1	3,39	7,58	
7,2	3,41	7,49	
7,3	3,42	7,44	
7,4	3,44	7,36	Приймається
7,5	3,45	7,31	
7,6	3,46	7,27	
8	3,52	7,01	

2. Визначаємо кількість повітря, яка поступає крізь нещільності в укріття з пластинчастого живильника, визначається за формулою (1.4)

$$G_{\text{ну.пл.ж}} = 0,65 F_{\text{н1}} \sqrt{2\rho'_0 P_1} = 0,65 \cdot 1,4 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,213 \cdot 5} = 3,17 \text{ кг/с.}$$

3. Визначаємо продуктивність відсмоктувача пластинчастого живильника

$$G_{\text{пл}} = (G_{\text{н}} - G_1) = (3,17 - 2,50) = 0,67 \text{ кг/с;}$$

Або продуктивність відсмоктувача з урахуванням коефіцієнтів запасу ( $k_3 = 1,2$ ) дорівнює

$$G_{\text{пл}} = (G_{\text{ну.пл.ж}} - G_1) k_3 = (3,17 - 2,50) \cdot 1,2 = 0,67 \cdot 1,2 = 0,80 \text{ кг/с;}$$

4. Визначаємо кількість повітря, яка просмоктується крізь нещільності у барабан, за формулою (1.4)

$$G_{\text{нб}} = 0,65 F_{\text{н1}} \sqrt{2\rho'_0 P_1} = 0,65 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,213 \cdot 15} = 1,96 \text{ кг/с.}$$

5. Визначаємо тепловміст, вологовміст та температуру пароповітряної суміші, яка уходить через розвантажувальний жолоб і в місцевий відсмоктувач барабану.

За формулою (1.36) знаходимо

$$I_6 = \frac{G_{\text{т}}(I_{\text{т}} - I'_{\text{т}}) + G_1 I_1}{G_1 + G_{\text{н}}} = \frac{G_{\text{т}} \cdot 0,75(t_{\text{т}} - t'_{\text{т}}) + G_1 \cdot 1 \cdot t'_y}{G_1 + G_{\text{н}}} =$$

$$= \frac{83,5 \cdot 0,75(450 - 100) + 2,50 \cdot 1 \cdot 117}{2,50 + 1,96} = 4\,980 \text{ кДж/кг,}$$

де 0,75 – питома теплоємність повернення, кДж/(кг·град.);  
 1 – питома теплоємність повітря, кДж/(кг·град.)

При заданому  $I_6$  (див. дод. Г) [4] знаходимо вологовміст насиченого повітря  $m'_0 = 1,83$  кг/кг, його температуру  $t'_0 = 92^\circ \text{C}$  та щільність  $\rho'_0 = 0,694$  кг/м<sup>3</sup>.

Примітка. За дод. Г [4] отримуємо:

Температура, °С	Парціальний тиск водяної пари, мм рт. ст.	Щільність повітря, кг/м <sup>3</sup>		Вологовміст насиченого повітря, г/кг	Тепловміст насиченого повітря, кДж/кг
		сухого	насиченого		
92	567,1	0,967	0,694	1 830	<b>4 980</b>

6. Визначаємо загальну кількість пароповітряної суміші, яка уходить з барабану (з урахуванням формули (1.37))

$$G_6 + G_2 = ((G_1 + G_{\text{НБ}})(1 + m'_0) - G_2) + G_2 = (G_1 + G_{\text{НБ}})(1 + m'_0) = \\ = (2,50 + 1,96)(1 + 1,83) = 12,6 \text{ кг/с}$$

7. Визначаємо кількість пароповітряної суміші, яка поступає з барабану в укриття башмака нижнього жолоба.

Для цього розраховуємо температуру пароповітряної суміші, яка поступає по жолобу в укриття за формулою (1.24)

$$t''_y = k_i \frac{t'_0 + t'_T}{2} = 1,0 \frac{92 + 100}{2} = 96^\circ \text{C};$$

Примітка. Поправочний коефіцієнт, який визначається в залежності від різниці температур ( $\Delta t = t'_T - t'_0 = 100 - 92 = 18^\circ \text{C}$ ) за табл. 1.1, звідки  $k_i = 1,0$  [4].

При  $t''_y = 96^\circ \text{C}$  (див. дод. Г) [4] щільність суміші  $\rho''_y = 0,643$  кг/м<sup>3</sup> та вологовміст  $m''_k = 4$  кг/кг (див. дод. Г) [4].

Примітка. За дод. Г [4] отримуємо:

Температура, °С	Парціальний тиск водяної пари, мм рт. ст.	Щільність повітря, кг/м <sup>3</sup>		Вологовміст насиченого повітря, г/кг	Тепловміст насиченого повітря, кДж/кг
		сухого	насиченого		
96	657,7	0,957	<b>0,643</b>	<b>4 000</b>	10 800

Тепловий напір визначається за формулою (1.23)

$$P_T'' = \frac{\rho'_0 - \rho''_y}{2} gH = \frac{1,213 - 0,643}{2} 9,8 \cdot 6,0 = 16,8 \text{ Н/м}^2.$$

Ежекційний напір з урахуванням формули (1.12)

$$\begin{aligned}
 P_e'' &= \frac{\bar{c}'' \varepsilon G_T [ |v''_к - v''_г|^3 - |v''_0 - v''_г|^3 ]}{4dF_2 a''_T} = \\
 &= \frac{\bar{c}'' \rho''_y G_T [ |v''_к - v''_г|^3 - |v''_0 - v''_г|^3 ]}{\rho_T 4dF_2 a''_T} = \\
 &= \frac{0,7 \cdot 0,643 \cdot 83,5 [ |10,4 - v''_г|^3 - |4,4 - v''_г|^3 ]}{4100 \cdot 4 \cdot 0,0041 \cdot 1 \cdot 9,8} = \\
 &= 0,058 \cdot [ |10,4 - v''_г|^3 - |4,4 - v''_г|^3 ] \text{ Н/м}^2.
 \end{aligned}
 \tag{C}$$

Швидкість повітря у жолобі з урахуванням формули (1.27) та формули (1.10)

$$\begin{aligned}
 v''_г &= \frac{G_{ж}}{\rho''_y F} = \frac{F_2}{\rho''_y F_2} \sqrt{\frac{P_e - P_{T''} + P_2 - P_6}{\zeta''_{ж2} \frac{1}{\rho''_y} + \frac{1}{\rho''_y} - \left( \frac{1+m'_0}{1+m'_к} \right)^2 \frac{1}{\rho''_0}}} = \\
 &= \frac{1}{0,643 \cdot 1} \sqrt{\frac{P_e - 16,8 + 8 - 15}{1,35 \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,643} + \frac{1}{0,643} - \left( \frac{1 + 1,83}{1 + 4} \right)^2 \frac{1}{1,213}}} = \\
 &= \frac{1}{0,643} \sqrt{\frac{P_e - 23,8}{1,050 + 1,555 - 0,32 \cdot 0,824}} = \frac{1}{0,643} \frac{\sqrt{P_e - 23,8}}{\sqrt{2,341}} = \frac{1}{0,643} \frac{\sqrt{P_e - 23,8}}{1,530} = \\
 &= 1,02 \sqrt{P_e - 23,8} \text{ м/с.}
 \end{aligned}
 \tag{D}$$

Вирішуючи методом послідовних наближень (бажано використовувати Excel) спільно рівняння (C) та (D), знаходимо швидкість  $v = 2,4$  м/с та витрату суміші, яка поступає в укриття башмака розвантажувального жолоба, з урахуванням формули (1.29)

$$G''_2 = v''_г \rho''_y F_2 = 2,4 \cdot 0,643 \cdot 1,0 = 1,54 \text{ кг/с.}$$

$P_e$	$v''_г = 1,02 \sqrt{P_e - 23,8}$	$P''_e = 0,058 \cdot [  10,4 - v''_г ^3 -  4,4 - v''_г ^3 ]$	Примітка
підставляється	визначається	визначається	
24	0,46	53,41	
25	1,12	44,31	
26	1,51	39,35	
27	1,82	35,64	
28	2,09	32,57	

$P_e$	$v''_r = 1,02\sqrt{P_e - 23,8}$	$P''_e = 0,058 \cdot [ 10,4 - v''_r ^3 -  4,4 - v''_r ^3]$	Примітка
підставляється	визначається	визначається	
29	2,33	29,97	
29,1	2,35	29,76	
29,2	2,37	29,55	
29,3	2,39	29,34	Приймається
29,4	2,41	29,13	
30	2,54	27,79	
31	2,74	25,8	

Кількість пароповітряної суміші, яка уходить з барабану по розвантажувальному жолобу, дорівнює

$$G'''_2 = G''_2 \left( \frac{1+m'_0}{1+m''_k} \right) = 1,54 \cdot \left( \frac{1+1,83}{1+4} \right) = 0,87 \text{ кг/с.}$$

8. Визначаємо продуктивність місцевого відсмоктувача барабану

$$G_6 = G_H - G'''_2 = 12,6 - 0,87 = 11,7 \text{ кг/с;}$$

з урахуванням коефіцієнту запасу ( $k_3 = 1,2$ ) дорівнює

$$G_6 = G_6 k_3 = 11,7 \cdot 1,2 = 14,04 \text{ кг/с.}$$

9. Визначаємо кількість пароповітряною сумішшю, яка поступає в укриття башмака розвантажувального жолоба крізь нещільності, за формулою (1.4)

$$G_{H2} = 0,65 F_{H2} \sqrt{2\rho''_0 P_2} = 0,65 \cdot 0,3 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,213 \cdot 8} = 0,86 \text{ кг/с.}$$

10. Визначаємо кількість пароповітряної суміші, яка відсмоктується з укриття башмака розвантажувального жолоба,

$$G_{y6} = G_{H2} + G''_2 = 0,86 + 1,54 = 2,40 \text{ кг/с}$$

або з урахуванням коефіцієнту запасу для нижнього відсмоктувача  $k_3 = 1,1$

$$G_{y6} = G_{y6} k_3 = 2,40 \cdot 1,1 = 2,64 \text{ кг/с.}$$

Об'єми аспірації, розраховані за наведеною методикою (п. 1.2, п.п. 1.2.4, приклад № 2), відповідали даним експериментальних досліджень місцевих відсмоктувачів барабанних охолоджувачів обпаленої руди ГЗК за даними [4]. Відхилення розрахованих об'ємів аспірації від фактичних коливань в межах 1,8 – 24 %, в середньому 10 % [4].

### 1.3 Завдання № 1

Визначити об'єм аспірації при перевантаженні сухого повернення з конвеєра на конвеєр (рис. 1.2). Вихідні дані наведені табл. 1.2, а інші вихідні дані приймаємо як в прикладі в п.п. 1.2.1-1.2.2. Завдання виконайте з урахуванням наведених вихідних даних в п.п. 1.2.1-1.2.2, приклад розв'язання завдання наведено в п.п. 1.2.2 «Приклад № 1: визначення об'єму аспірації при перевантаженні сухого повернення з конвеєру на конвеєр».

Таблиця 1.2 – Вихідні дані до завдання № 1 за варіантами

№ варіанту	Витрата повернення $G_T$ , кг/с	Температура повітря в приміщенні $t_0$ , °C	Клас, мм					
			20 – 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1,25	1,25 – 0,63	0,63 – 0
0 (приклад)	38	18	Вихід, %					
			2	31	25	24	8	10
1	37	16	3	30	26	23	7	11
2	39	17	2	32	24	24	7	11
3	40	19	4	29	27	22	6	12
4	37	20	3	31	25	23	6	12
5	40	21	5	28	28	21	5	13
6	41	22	4	30	26	22	5	13
7	38	23	3	30	26	23	7	11
8	41	16	2	31	28	21	8	10
9	42	17	4	29	27	22	6	12
10	39	19	3	31	25	23	6	12
11	42	20	5	28	28	21	5	13
12	43	21	4	30	26	22	5	13
13	40	22	6	27	29	20	4	14
14	41	23	5	29	27	21	4	14
15	42	16	4	29	27	22	6	12
16	39	17	3	30	29	20	7	11
17	42	19	5	28	28	21	5	13
18	43	20	4	30	26	22	5	13
19	40	21	6	27	29	20	4	14
20	43	22	5	29	27	21	4	14
21	44	23	7	26	30	19	3	15
22	41	16	6	28	28	20	3	15
23	44	17	5	28	28	21	5	13
24	40	19	4	29	30	19	6	12
25	42	20	6	27	29	20	4	14

### 1.4 Завдання № 2

Визначити об'єм аспірації барабанного охолоджувача повернення (рис. 1.3). Вихідні дані наведені табл. 1.3, а інші вихідні дані приймаємо як в прикладі в п.п. 1.2.3-1.2.4. Завдання виконайте з урахуванням наведених вихідних даних в п.п. 1.2.3-1.2.4, приклад розв'язання завдання наведено в п.п. 1.2.4 «Приклад № 2: визначення об'єму аспірації барабанного охолоджувача повернення».

Таблиця 1.3 – Вихідні дані до завдання № 2 за варіантами

№ варіанту	Витрата матеріалу $G_T$ , кг/с	Температура повітря в приміщенні $t_0$ , °С	Клас, мм					
			20 – 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1,25	1,25 – 0,63	0,63 – 0
0 (приклад)	83,5	18	Вихід, %					
			2	31	25	24	8	10
1	87,7	16	3	30	26	23	7	11
2	92,1	17	2	32	24	24	7	11
3	96,7	19	4	29	27	22	6	12
4	95,7	20	3	31	25	23	6	12
5	94,7	21	5	28	28	21	5	13
6	93,8	22	4	30	26	22	5	13
7	92,9	23	3	30	26	23	7	11
8	92	16	2	31	28	21	8	10
9	91,1	17	4	29	27	22	6	12
10	90,2	19	3	31	25	23	6	12
11	89,3	20	5	28	28	21	5	13
12	88,4	21	4	30	26	22	5	13
13	87,5	22	6	27	29	20	4	14
14	86,6	23	5	29	27	21	4	14
15	85,7	16	4	29	27	22	6	12
16	84,8	17	3	30	29	20	7	11
17	84	19	5	28	28	21	5	13
18	83,2	20	4	30	26	22	5	13
19	82,4	21	6	27	29	20	4	14
20	81,6	22	5	29	27	21	4	14
21	80,8	23	7	26	30	19	3	15
22	80	16	6	28	28	20	3	15
23	79,2	17	5	28	28	21	5	13
24	78,4	19	4	29	30	19	6	12
25	77,6	20	6	27	29	20	4	14

### Питання для самоперевірки

1. Назвіть основні складові рівняння балансу мас, яке покладено в основу розрахункових методів визначення оптимального повітрообміну в аспіраційних укриттях технологічного обладнання.

2. Як визначається кількість повітря, яке поступає через нещільності укриття і робочі отвори?

3. Що впливає на утворення потоку повітря в жолобі, коли по жолобу перевантажується сипкий матеріал з температурою, відмінною від температури навколишнього середовища?

4. За яких умов, як правило, відбувається паровиділення при перевантаженні гарячих матеріалів на гірничо-збагачувальних комбінатах?

5. За яких умов можливе спрощення розрахунку аспірації перевантаження сухих гарячих матеріалів?

## Перелік рекомендованих джерел

1. Pittsburgh Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing / Cecala A. B. et al. Second edition. Pittsburgh, PA : U.S., 2019. 406 p. DOI: <https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB2019124>.
2. The Global Health Cost of PM 2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. International Development in Focus. Washington, DC : World Bank, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1816-5>. URL: <https://read.kortext.com/reader/pdf/2149376/Front%20Cover> (дата звернення: 14.08.2024)
3. Галай В. А., Максимова Н. М. Вдосконалення технологічної системи аспірації в процесах транспортування сипких матеріалів на прикладі дільниці коксортування. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. Вип. 3. С. 147-156. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).22](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).22).
4. Джерела та процеси забруднення атмосфери : конспект лекцій / уклад.: В. Є. Бекетов, Г. П. Євтухова. Харків : ХНУМГ ім. О. Н. Бекетова, 2019. 113 с.
5. Процеси та апарати пилогазоочищення : практикум / укладачі: О. В. Рибалова, Б. М. Цимбал, О. О. Бондаренко. Харків : НУЦЗУ, 2023. 54 с.
6. Технології захисту навколишнього середовища (захист атмосфери) : підручник / В. Г. Петрук та ін. Херсон : Олді-плюс, 2019. 432 с.

## Зміст та вимоги до контрольних точок

Назва контрольної точки	Опис контрольної точки, порядок її проходження та отримання балів
Робота на практичних заняттях	<p>Практичні роботи виконуються безпосередньо на занятті, що є бажаним, однак не обов'язковим; матеріали для виконання практичної роботи доступні в записі, які зберігаються в Microsoft Teams, та викладені в повному обсязі в Moodle. Оцінка за практичну роботу виставляється за фактом виконання та враховуючи правильність розрахунків. Якщо студент виконав роботу з помилками, то за згодою з викладачем може допрацювати свої розрахунки та підвищити оцінки, але не пізніше залікового тижня.</p> <p>Оцінка за захист роботи на практичному (семінарському) занятті виставляється в Moodle наприкінці заняття або продовж доби, після заняття, та може бути оскаржена одразу ж або продовж доби, після виставлення оцінки в Moodle.</p> <p><u>Мах 8 балів:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– студент дав пряму і релевантну відповідь на поставлене питання з використанням обґрунтованого посилання на теоретичний матеріал та варіації зміни відповідь на зміну вхідних умов, в т.ч. у вигляді додаткових запитань / зміг стисло формалізувати вербально сутність проблеми за ситуацією, ідентифікувати ключові складові і пріоритети вирішення, запропонував логічне розв'язання та виконав вірно завдання і проявив організованість при оформленні розрахункової частини, а за потреби розрахунково-графічної частини (6 балів);</li> <li>– оцінка ініціативності у роботі над проблемою, логічності та структурованості відповіді, здатності комунікувати у команді та під впливом</li> </ul>

<b>Назва контрольної точки</b>	<b>Опис контрольної точки, порядок її проходження та отримання балів</b>
	негативних факторів, в т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним і самокритичним (2 бали)

## Практична робота № 2

### Визначення розмірів пилоосаджувальної камери та вибір циклону

#### 2.1 Розрахунок матеріального балансу

Розраховуємо об'ємну витрату газу за рік [1]:

$$V_p = V_r \cdot 365 \cdot 24, \text{ м}^3/\text{рік} \quad (2.1)$$

де  $V_r$  – об'ємна витрата газу за годину,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Розраховуємо масу вхідного пилу:

$$m_1 = C_{\text{вх пилу}} \cdot V_p, \text{ т/рік} \quad (2.2)$$

Розраховуємо кількість пилу, що видалилася у першому апараті пилоочищення:

$$m_2 = m_1 \cdot \eta_1, \text{ т/рік} \quad (2.3)$$

де  $\eta_1$  – ефективність очищення від пилу у першому апараті очищення, %

Кількість пилу, що подається на другий апарат пилоочищення:

$$m_3 = m_1 - m_2, \text{ т/рік} \quad (2.4)$$

Визначимо концентрацію пилу вихідних газів після першого апарату:

$$C_l = m_3 / V_p, \text{ т/м}^3 \quad (2.5)$$

Якщо концентрація пилу не відповідає гранично допустимій концентрації, розраховуємо масу вловленого пилу у другому апараті:

$$m_4 = m_3 \cdot \eta_2, \text{ т/рік} \quad (2.6)$$

де  $\eta_2$  – ефективність очищення від пилу у другому апараті пилоочищення, %

Маса пилу після другого апарату в очищеній газопиловій суміші [1]:

$$m_5 = m_3 - m_4, \text{ т/рік} \quad (2.7)$$

Визначимо концентрацію пилу після другого апарату:

$$C_{II} = m_5/V_p, \text{ т/м}^3, \text{ мг/м}^3. \quad (2.8)$$

Якщо залишкова концентрація пилу менша або дорівнює гранично допустимій концентрації, тоді розраховуємо масу розчиненого газу, що подається на перший абсорбційний апарат:

$$m_6 = C_r \cdot V_p, \text{ кг/рік} \quad (2.9)$$

Маса абсорбованого газу в першому апараті:

$$m_7 = m_6 \cdot \eta_3, \text{ кг/рік} \quad (2.10)$$

Кількість розчиненого газу, що виділяється з першого апарату:

$$m_8 = m_6 - m_7, \text{ кг/рік} \quad (2.11)$$

Концентрація розчиненого газу після першого апарату:

$$C_{III} = m_8/V_p, \text{ кг/м}^3, \text{ мг/м}^3. \quad (2.12)$$

Якщо концентрація розчиненого газу після першого абсорбційного апарату перевищує гранично допустиму концентрацію, далі розрахунки продовжуємо для другого апарату. Після розрахунків складаємо блок-схему матеріального балансу.

### 2.1.1 Приклад розрахунку матеріального балансу

Задача (приклад)

Розрахуйте матеріальний баланс [1].

Вихідні дані:

- об'ємна витрата газу  $V_r = 44\,000 \text{ м}^3/\text{год}$ ;
- запиленість газового потоку  $C_{\text{вх пилу}} = 570 \text{ г/м}^3$ ;
- концентрація  $\text{SO}_2$  в газах  $C_{\text{SO}_2} = 0,01 \text{ кг/м}^3 = 10 \text{ г/м}^3$ ;
- ГДК<sub>р.з. пилу</sub> =  $1 \text{ мг/м}^3$ ;
- ГДК<sub>р.з. SO2</sub> =  $0,5 \text{ мг/м}^3$ ;
- ефективність очищення від пилу у циклоні  $\eta_1 = 88,3 \% = 0,883$ ;

- ефективність очищення від пилу на електрофільтрі  $\eta_2 = 99,999\% = 0,99999$ ;

- ефективність видалення  $\text{SO}_2$  в першому скрубєрі  $\eta_3 = 99\% = 0,99$ ;

- ефективність видалення  $\text{SO}_2$  в другому скрубєрі  $\eta_4 = 99,9\% = 0,999$ .

Рішення

Розраховуємо об'ємну витрату газу за рік за формулою (2.1):

$$V_p = 44000 \cdot 365 \cdot 24 = 385440 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{рік}.$$

Розраховуємо масу вхідного пилу за формулою (2.2):

$$m_1 = 570 \cdot 385440 \cdot 10^3 = 219\,700\,800\,000 \text{ г/рік} = 219\,700\,800 \text{ кг/рік} = 219\,701 \text{ т/рік}.$$

Розраховуємо кількість пилу, що видалилася у циклоні, за формулою (2.3):

$$m_2 = 219\,701 \cdot 0,883 = 193\,996 \text{ т/рік}.$$

Кількість пилу, що подається на електрофільтр, за формулою (2.4):

$$m_3 = 219\,701 - 193\,996 = 25\,705 \text{ т/рік}.$$

Визначимо концентрацію пилу вихідних газів після циклону за формулою (2.5):

$$C_{\text{цикл}} = 25\,705 / 385\,440 \cdot 10^3 = 0,00006669 \text{ т/м}^3 = 66,7 \text{ г/м}^3.$$

Отже, концентрація пилу не відповідає гранично допустимій концентрації.

Розраховуємо масу вловленого пилу на електрофільтрі за формулою (2.6):

$$m_4 = 25\,705 \cdot 0,99999 = 25704,7 \text{ т/рік}.$$

Маса пилу після електрофільтру в очищеній газопиловій суміші:

$$m_5 = 25\,705 - 25\,704,7 = 0,3 \text{ т/рік}.$$

Визначимо концентрацію пилу після електрофільтру:

$$C_{\text{елект}} = 0,3 / 385440 \cdot 10^3 = 7,78 \cdot 10^{-10} \text{ т/м}^3 = 0,78 \text{ мг/м}^3.$$

Отже, концентрація пилу менша гранично допустимої концентрації.  
Маса SO<sub>2</sub>, що подається на перший скруббер:

$$m_6 = 0,01 \cdot 385\,440 \cdot 10^3 = 3\,854\,400 \text{ кг/рік.}$$

Маса видаленого SO<sub>2</sub> в першому скруббері:

$$m_7 = 3\,854\,400 \cdot 0,99 = 3\,815\,856 \text{ кг/рік.}$$

Кількість SO<sub>2</sub>, що виділяється з першого скрубберу:

$$m_8 = 3\,854\,400 - 3\,815\,856 = 38\,544 \text{ кг/рік.}$$

Концентрація SO<sub>2</sub> після першого скрубберу:

$$C_{\text{скруб I}} = 38544 / 385440 \cdot 10^3 = 0,0001 \text{ кг/м}^3 = 0,1 \text{ г/м}^3.$$

Концентрація SO<sub>2</sub> після першого скрубберу перевищує гранично допустиму концентрацію.

Маса видаленого SO<sub>2</sub> в другому скруббері:

$$m_9 = 38\,544 \cdot 0,999 = 38505,5 \text{ кг/рік.}$$

Кількість SO<sub>2</sub>, що виділяється з другого скрубберу:

$$m_{10} = 38544 - 38505,5 = 38,5 \text{ кг/рік.}$$

Концентрація SO<sub>2</sub> після другого скрубберу:

$$C_{\text{скруб II}} = 38,5 / 385440 \cdot 10^3 = 0,099 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3 \approx 0,1 \text{ мг/м}^3.$$

Отже, концентрація SO<sub>2</sub> нижче гранично допустимої концентрації.  
Технологічна схема вибрана правильно (рис. 2.1).

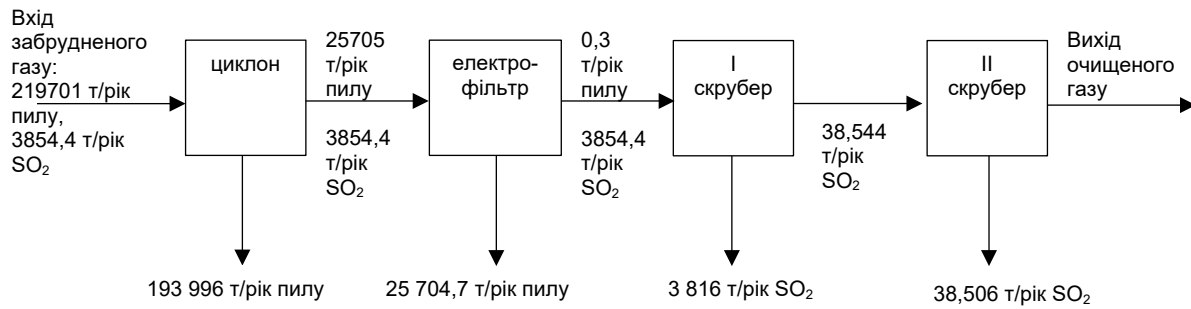


Рисунок 2.1 – Блок-схема матеріального балансу очисних споруд [1]

## 2.2 Визначення розмірів пилоосаджувальної камери

Пилоосаджувальні камери (рис. 2.2) представляють собою пустотілі або з горизонтальними полицями камери, які виготовляють з цегли, залізобетону або сталі. Для досягнення прийнятної ефективності очищення газів необхідно, щоб частки пилу знаходились в камері якнайбільше часу, що обумовлює громіздкість споруд [1].

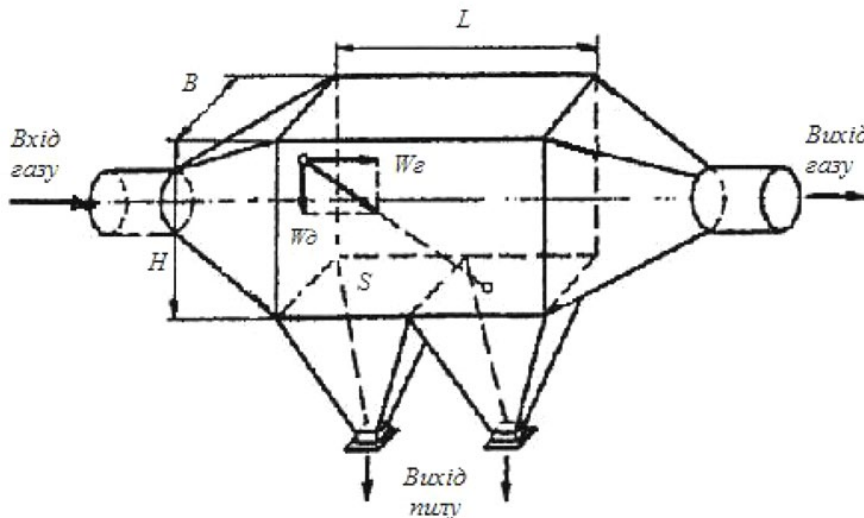


Рисунок 2.2 – Пилоосаджувальна камера [1]

Розраховуємо швидкість осадження пилових часток [1]:

$$w_d = \frac{d_c^2 \cdot \rho \cdot g}{18 \cdot \mu}, \text{ м/с,} \quad (2.13)$$

- де  $d_c$  – мінімальний діаметр часток пилу, які необхідно видалити з газу, м;  
 $\rho$  – щільність матеріалу пилу, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – динамічна в'язкість, Н·с/м<sup>2</sup> або Па·с

При цьому приймається, що пилові частки з розміром, більшим мінімального діаметра  $d_c$ , повністю вловлюються в пилоосаджувальній камері; частки по перерізу камери розподілені рівномірно; швидкість газу постійна; пилові частки, що осіли, не виносяться з камери.

Визначимо площу дна осадження камери [1]:

$$S = \frac{V}{w_d}, \text{ м}^2, \quad (2.14)$$

де  $V$  – витрата газу,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Приймаючи швидкість газу в камері в горизонтальному напрямку  $w_r = 1-2$  м/с, при якій осаджуються часточки пилу розміром більше ніж 30-40 мкм, знайдемо площу вертикального перерізу камери:

$$S_1 = \frac{V}{3600 \cdot w_r}, \text{ м}^2, \quad (2.15)$$

Приймаючи потрібну висоту камери  $H$ , ширина камери становитиме:

$$B = \frac{S_1}{H}, \text{ м}. \quad (2.16)$$

Довжина камери:

$$L = \frac{S}{B}, \text{ м}. \quad (2.17)$$

З формул зрозуміло, що при інших рівних умовах мінімальний розмір затриманих часток залежить від площі дна камери:

$$S = L \cdot B, \text{ м}^2. \quad (2.18)$$

При збільшенні площі збільшується термін перебування часток в камері, а відповідно, і ефективність їх осадження. Проте збільшення площі дна камери приводить до збільшення її габаритних розмірів та вартості.

Ефективність пиловловлення:

$$\eta = \left( \frac{w_d \cdot L}{w_r \cdot H} \right) \cdot 100\% \quad (2.19)$$

Для підвищення ефективності пиловловлювання іноді в камерах встановлюють горизонтальні полиці, при цьому не спостерігається збільшення габариту камери, тому що збільшується добуток  $L \cdot B$ . На практиці виявилось, що полиці незначно підвищують ефективність

осадження часток, тому що при видаленні пилу з полок частина часток, що на них осіли, виноситься з газовим потоком.

Для визначення швидкості осадження часток можна скористатися такими експериментальними даними з табл. 2.1 [1].

Таблиця 2.1 – Залежність швидкості осадження часток від їх діаметру [1]

Діаметр часток, мкм	Швидкість осадження, см/с
0,1	$8,7 \cdot 10^{-5}$
0,2	$2,3 \cdot 10^{-4}$
0,4	$6,8 \cdot 10^{-4}$
1	$3,5 \cdot 10^{-3}$
2	$1,19 \cdot 10^{-2}$
4	$5,1 \cdot 10^{-2}$
10	$3,06 \cdot 10^{-1}$
20	1,2
40	4,8
100	24,6
400	157,0
1000	382,0

## 2.2.1 Приклад визначення розмірів пилоосаджувальної камери

Задача (приклад) [1].

Вхідні параметри:

діаметр часток  $d_{\text{ч}} > 80 \text{ мкм} = 80 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;

витрата газу  $V = 30000 \text{ м}^3/\text{год}$ ;

щільність часток пилу  $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ ;

динамічна в'язкість газу  $\mu = 20,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$ .

Рішення

Розраховуємо швидкість осадження пилових часток діаметром 80 мкм за формулою (2.13):

$$w_{\text{д}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot \rho \cdot g}{18 \cdot \mu} = \frac{(80 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2500 \cdot 9,81}{18 \cdot 20,8 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= (156\,800\,000 \cdot 10^{-12}) / (374,4 \cdot 10^{-6}) = 418\,803,4188 \cdot 10^{-6} = 0,42 \text{ м/с}$$

- де  $d_{\text{ч}}$  – мінімальний діаметр часток пилу, які необхідно видалити з газу, ( $80 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , див. вихідні дані);
- $\rho$  – щільність матеріалу пилу, ( $2500 \text{ кг/м}^3$ , див. вихідні дані);
- $\mu$  – динамічна в'язкість,  $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$  або  $\text{Па}\cdot\text{с}$  ( $20,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$ , див. вихідні дані)

Визначимо площу дна осадження камери за формулою (2.14):

$$S = \frac{V}{w_d} = \frac{30\,000}{3600 \cdot 0,42} = 19,84 \text{ м}^2,$$

де  $V = 30\,000 \text{ м}^3/\text{год}$  – витрата газу,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Приймаючи швидкість газу в камері в горизонтальному напрямку  $w_r = 1 \text{ м/с}$ , знайдемо площу вертикального перерізу камери за формулою (2.15):

$$S_1 = \frac{V}{3600 \cdot w_r} = \frac{30000}{3600 \cdot 1} = 8,33 \text{ м}^2$$

Вибираємо висоту камери рівною 2 м, при цьому її ширина становитиме (див. формулу (2.16)):

$$B = \frac{S_1}{H} = \frac{8,33}{2} = 4,17 \text{ м}.$$

Довжина камери визначається за формулою (2.17):

$$L = \frac{S}{B} = \frac{19,84}{4,17} = 4,76 \text{ м}.$$

Ефективність пилоловлення визначається за формулою (2.19):

$$\eta = \left( \frac{w_d \cdot L}{w_r \cdot H} \right) \cdot 100\% = \frac{0,42 \cdot 4,76}{1 \cdot 2} \cdot 100\% = 99,9 \%$$

### 2.3 Розрахунок пилоосаджувальної камери

Розраховуємо швидкість потоку в перерізі пилоосаджувальної камери [1]:

$$v = \frac{V}{3600 \cdot H \cdot B}, \text{ м/с} \quad (2.20)$$

де  $V$  – витрата газу через камеру,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  
 $H, B$  – висота та ширина камери, м

Для часток, вловлених в камері з ефективністю 50%, знаходимо відносну швидкість витання ( $w$ ) з рівняння:  $\left(\frac{w}{v}\right)_{50} = 1,5 \frac{H}{L}$ . Звідси відносна швидкість витання часток:

$$w_{50} = 1,5 \frac{H}{L} \cdot v, \text{ м/с, см/с} \quad (2.21)$$

За номограмою, приведеною на рис. 2.3, по розрахованій швидкості витання, заданій густині часток  $\rho$  та температурі  $t$  знаходимо розмір часток  $d_{50}$ , що видаляються в камері з ефективністю 50%. Для визначення залежності  $\eta_n = f(d)$  вибираємо декілька додаткових відносних швидкостей витання часток  $w^1$  і  $w^2$ , для цього приймаємо більше та менше значення  $\left(\frac{w}{v}\right)_{50}$ . По номограмі знаходимо діаметр часток  $d_1$  та  $d_2$  відповідно значенням швидкостей витання [1].

Діаметр часток, мкм

Швидкість витання, см/с

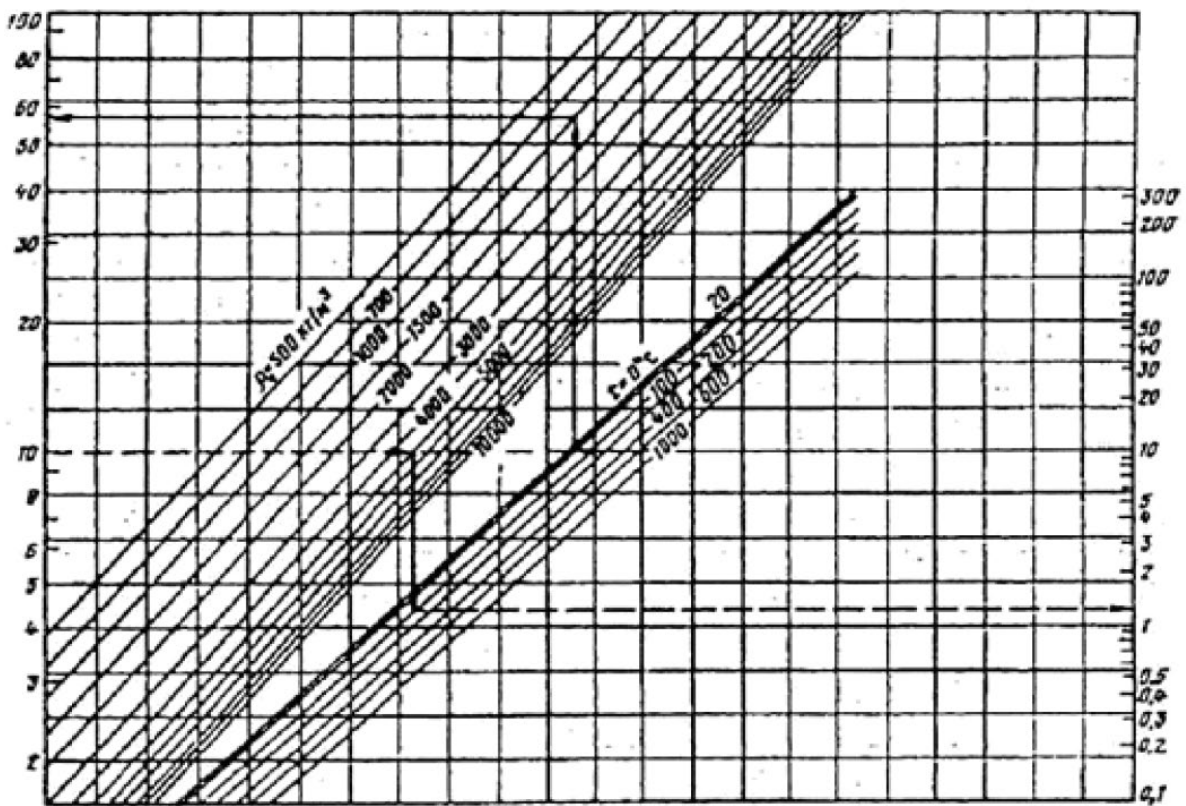


Рисунок 2.3 – Номограма визначення діаметру часток [1]

Середня концентрація часток на виході з камери визначається як середня величина в 4-5 точках перетину. З цією метою задаємося 5-ма значеннями  $h/H = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ . При цьому  $h$  – відстань від стелі камери, м. Результат розрахунків представляємо у наступному вигляді для кожного  $\left(\frac{w}{v}\right)$ :

$h/H$	0	0,25	0,50	0,75	1,00
$X_1$					
$X_2$					

h/H	0	0,25	0,50	0,75	1,00
$\Phi(x_1)$					
$\Phi(x_2)$					
n					

При цьому [1]

$$x_1 = \frac{1 + \left(\frac{h}{H}\right) - \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \left(\frac{w}{v}\right)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L}{H}\right)}}; \quad (2.22)$$

$$x_2 = \frac{1 - \left(\frac{h}{H}\right) + \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \left(\frac{w}{v}\right)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L}{H}\right)}}; \quad (2.23)$$

$\Phi(x_1)$  і  $\Phi(x_2)$  знаходимо з таблиці нормальної функції розподілу (табл. 2.2) [1], значення n – за формулою:  $n = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1$ .

Таблиця 2.2 – Значення нормальної функції розподілу [1]

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6	7	8
-2,70	0,0035	-1,06	0,1446	0,00	0,5000	1,08	0,8599
-2,60	0,0047	-1,04	0,1492	0,02	0,5080	1,10	0,8643
-2,50	0,0062	-1,02	0,1539	0,04	0,5160	1,12	0,8686
-2,40	0,0082	-1,00	0,1587	0,06	0,5239	1,14	0,8729
-2,30	0,0107	-0,98	0,1635	0,08	0,5319	1,16	0,8770
-2,20	0,0139	-0,96	0,1685	0,10	0,5398	1,18	0,8810
-2,10	0,0179	-0,94	0,1736	0,12	0,5478	1,20	0,8849
-2,00	0,0228	-0,92	0,1788	0,14	0,5557	1,22	0,8888
-1,98	0,0239	-0,90	0,1841	0,16	0,5636	1,24	0,8925
-1,96	0,0250	-0,88	0,1894	0,18	0,5714	1,26	0,8962
-1,94	0,0262	-0,86	0,1949	0,20	0,5793	1,28	0,8997
-1,92	0,0274	-0,84	0,2005	0,22	0,5871	1,30	0,9032
-1,90	0,0288	-0,82	0,2061	0,24	0,5948	1,32	0,9066
-1,88	0,0301	-0,80	0,2119	0,26	0,6026	1,34	0,9099
-1,86	0,0314	-0,78	0,2177	0,28	0,6103	1,36	0,9131
-1,84	0,0329	-0,76	0,2236	0,30	0,6179	1,38	0,9162
-1,82	0,0344	-0,74	0,2297	0,32	0,6255	1,40	0,9192
-1,80	0,0359	-0,72	0,2358	0,34	0,6331	1,42	0,9222
-1,78	0,0375	-0,70	0,2420	0,36	0,6406	1,44	0,9251
-1,76	0,0392	-0,68	0,2483	0,38	0,6480	1,46	0,9279
-1,74	0,0409	-0,66	0,2546	0,40	0,6554	1,48	0,9306
-1,72	0,0427	-0,64	0,2611	0,42	0,6628	1,50	0,9332
-1,70	0,0446	-0,62	0,2676	0,44	0,6700	1,52	0,9357
-1,68	0,0465	-0,60	0,2743	0,46	0,6772	1,54	0,9382
-1,66	0,0485	-0,58	0,2810	0,48	0,6844	1,56	0,9406
-1,64	0,0505	-0,56	0,2877	0,50	0,6915	1,58	0,9429
-1,62	0,0526	-0,54	0,2946	0,52	0,6985	1,60	0,9452
-1,60	0,0548	-0,52	0,3015	0,54	0,7054	1,62	0,9474
-1,58	0,0571	-0,50	0,3085	0,56	0,7123	1,64	0,9495
-1,56	0,0594	-0,48	0,3156	0,58	0,7190	1,66	0,9515

x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)
1	2	3	4	5	6	7	8
-1,54	0,0618	-0,46	0,3228	0,60	0,7257	1,68	0,9535
-1,52	0,0643	-0,44	0,3300	0,62	0,7324	1,70	0,9554
-1,50	0,0668	-0,42	0,3372	0,64	0,7389	1,72	0,9573
-1,48	0,0694	-0,40	0,3446	0,66	0,7454	1,74	0,9591
-1,46	0,0721	-0,38	0,3520	0,68	0,7517	1,76	0,9608
-1,44	0,0749	-0,36	0,3594	0,70	0,7580	1,78	0,9625
-1,42	0,0778	-0,34	0,3669	0,72	0,7642	1,80	0,9641
-1,40	0,0808	-0,32	0,3745	0,74	0,7703	1,82	0,9656
-1,38	0,0838	-0,30	0,3821	0,76	0,7764	1,84	0,9671
-1,36	0,0869	-0,28	0,3897	0,78	0,7823	1,86	0,9686
-1,34	0,0901	-0,26	0,3974	0,80	0,7881	1,88	0,9699
-1,32	0,0934	-0,24	0,4052	0,82	0,7939	1,90	0,9713
-1,30	0,0968	-0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
-1,30	0,0968	-0,20	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
-1,28	0,1003	-0,18	0,4286	0,88	0,8106	1,96	0,9750
-1,26	0,1038	-0,16	0,4364	0,90	0,8159	1,98	0,9761
-1,24	0,1075	-0,16	0,4364	0,92	0,8212	2,00	0,9772
-1,22	0,1112	-0,14	0,4443	0,94	0,8264	2,10	0,9821
-1,20	0,1151	-0,12	0,4522	0,96	0,8315	2,20	0,9861
-1,18	0,1190	-0,10	0,4602	0,96	0,8315	2,30	0,9893
-1,16	0,1230	-0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,40	0,9918
-1,14	0,1271	-0,06	0,4761	1,00	0,8413	2,50	0,9938
-1,12	0,1314	-0,04	0,4840	1,02	0,8461	2,60	0,9953
-1,10	0,1357	-0,02	0,4920	1,04	0,8508	2,70	0,9965
-1,08	0,1401	-0,00	0,5000	1,06	0,8554		

Після визначення середнього значення  $n_{\text{сер}}$  розраховуємо парціальний коефіцієнт очищення газу для камер з  $L/H > 3$  за формулою для трьох значень  $\left(\frac{w}{v}\right)$ :

$$\eta_n = (1 - n_{\text{сер}}) \cdot 100\%, \% \quad (2.24)$$

### 2.3.1 Приклад розрахунку пилоосаджувальної камери

Задача (приклад) [1].

Вхідні параметри:

довжина  $L = 15$  м;

висота  $H = 1,5$  м;

ширина  $B = 3$  м;

витрата повітря  $V = 15000$  м<sup>3</sup>/год;

густина часток  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>;

температура  $t = 0$  °С.

Рішення

Розраховуємо швидкість потоку в перерізі пилоосаджувальної камери за формулою (2.20):

$$v = \frac{V}{3600 \cdot H \cdot B} = \frac{15000}{3600 \cdot 1,5 \cdot 3} = 0,93 \text{ м/с}$$

де  $V$  – витрата газу через камеру, (15000 м<sup>3</sup>/год, див. вихідні дані);  
 $H, B$  – висота та ширина камери, ( $H = 1,5$  м,  $B = 3$  м, див. вихідні дані)

Для часток, вловлених з ефективністю 50%, знаходимо відносну швидкість витання ( $w$ ) з рівняння:  $\left(\frac{w}{v}\right)_{50} = 1,5 \frac{1,5}{15} = 0,15$ .

Звідси відносна швидкість витання часток (див. формулу (2.21)):

$$w_{50} = 1,5 \frac{H}{L} \cdot v = 0,15 \cdot 0,93 = 0,14 \text{ м/с}$$

За номограмою на рис. 2.3 знаходимо розмір часток  $d_{50}$ , що видаляються в камері з ефективністю 50%:  $d_{50} = 40$  мкм.

Додаткові значення  $\left(\frac{w}{v}\right)$ , необхідні для визначення декількох точок залежності  $\eta_n = f(d)$ , приймаємо більше або менше значення  $\left(\frac{w}{v}\right)_{50}$ :

$$0,1 < 0,15 < 0,2$$

$$\left(\frac{w^1}{v}\right) = 0,1; \quad \left(\frac{w^2}{v}\right) = 0,2.$$

Знаходимо відносну швидкість витання часток:

$$w^1 = \left(\frac{w^1}{v}\right) \cdot v = 0,1 \cdot 0,93 = 0,09 \text{ м/с} = 9 \text{ см/с};$$

$$w^2 = \left(\frac{w^2}{v}\right) \cdot v = 0,2 \cdot 0,93 = 0,19 \text{ м/с} = 19 \text{ см/с}.$$

За номограмою на рис. 2.3 знаходимо відповідний діаметр вловлених часток:  $d_1 = 30$  мкм;  $d_2 = 45$  мкм.

Подальші результати розрахунків представляємо у наступному вигляді для  $\left(\frac{w^1}{v}\right) = 0,1$ :

$$x_1 = \frac{1 + \left(\frac{h}{H}\right) - \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \left(\frac{w^1}{v}\right)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L}{H}\right)}} = \frac{1 + (0) - \left(\frac{15}{1,5}\right) \cdot (0,1)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{15}{1,5}\right)}} = 0$$

Для  $\left(\frac{w^2}{v}\right) = 0,2$ :

$$x_2 = \frac{1 - \left(\frac{h}{H}\right) + \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \left(\frac{w^2}{v}\right)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L}{H}\right)}} = \frac{1 - (0) + \left(\frac{15}{1,5}\right) \cdot (0,2)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{15}{1,5}\right)}} = 7,54717.$$

За табл. 2.2 для  $x_1 = 0$  визначається  $\Phi(x_1) = 0,5000$ ;  $x_2 = 7,54717$  визначається  $\Phi(x_2) = 1,0$ .

Тоді значення  $n$  – за формулою:  $n = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1 = 0,5 + 1 - 1 = 0,5$ .

Вище наведені та аналогічні розрахунки зводиться в табличну форму.

h/H	0	0,25	0,5	0,75	1
$x_1$	0	0,943396	1,886792	2,830189	3,773585
$x_2$	7,54717	6,603774	5,660377	4,716981	3,773585
$\Phi(x_1)$	0,5	0,8413	0,9713	1	1
$\Phi(x_2)$	1	1	1	1	1
$n$	0,5	0,8413	0,9713	1	1

Середнє значення  $n_{\text{сер}} = (0,5 + 0,8413 + 0,9713) / 3 = 0,77087$ , а парціальний коефіцієнт очищення газу для часток розміром  $d = 40$  мкм  $\eta_n = (1 - n_{\text{сер}}) \cdot 100\% = (1 - 0,77087) \cdot 100\% = 22,9\%$ .

## 2.4 Розрахунок та вибір циклону

До циліндричних циклонів відносяться циклони типу ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У та ЦН-24 (табл. 2.3-2.5, рис. 2.4). Характерними особливостями апаратів цієї групи є наявність подовженої циліндричної частини, кут нахилу кришки та вхідного патрубку – відповідно 11, 15 та 24° і однакове співвідношення діаметру вихлопної труби до діаметру циклона, що складає 0,59. Циклон типу ЦН-15У має меншу висоту [1-3].

Таблиця 2.3 – Параметри, що визначають ефективність циклонів [1, 3]

Параметри	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
-----------	-------	--------	-------	-------	-----------	----------	-----------

$d_{\eta=50}^T$ , МКМ	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
$\sigma_{\eta}^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340
$v_{опт}$ , М/С	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

Примітка. «\*» Значення  $d_{\eta=50}^T$ , що наведені в таблиці, відповідають наступним умовам роботи циклона: середня швидкість газу в циклоні  $v = 3,5$  м/с; діаметр циклона  $D = 0,6$  м; густина часток  $\rho = 1930$  кг/м<sup>3</sup>; динамічна в'язкість газу  $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Н·с/м<sup>2</sup>.

Таблиця 2.4 – Параметри, які визначають ефективність циклонів конструкції ВЦНДІОП і Гіпродеревопром [3]

Параметри	Марка циклона			
	СІОП	ВЦНДІОП	Ц	«Клайпеда»
$d_{\eta=50}^T$ , МКМ	2,6	8,6	4,12	3,1
$\sigma_{\eta}^T$	0,28	0,32	0,34	0,25
$v_{опт}$ , М/С	1,00	4,00	3,3	1,1
$\xi$	1400	75	210	1300

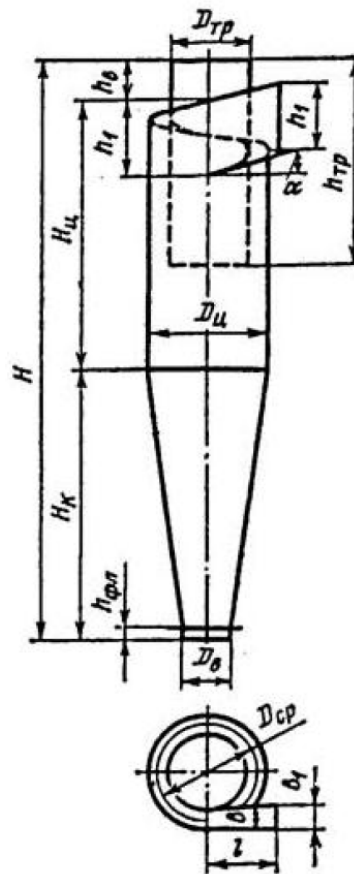


Рисунок 2.4 – Циліндричний циклон [1]

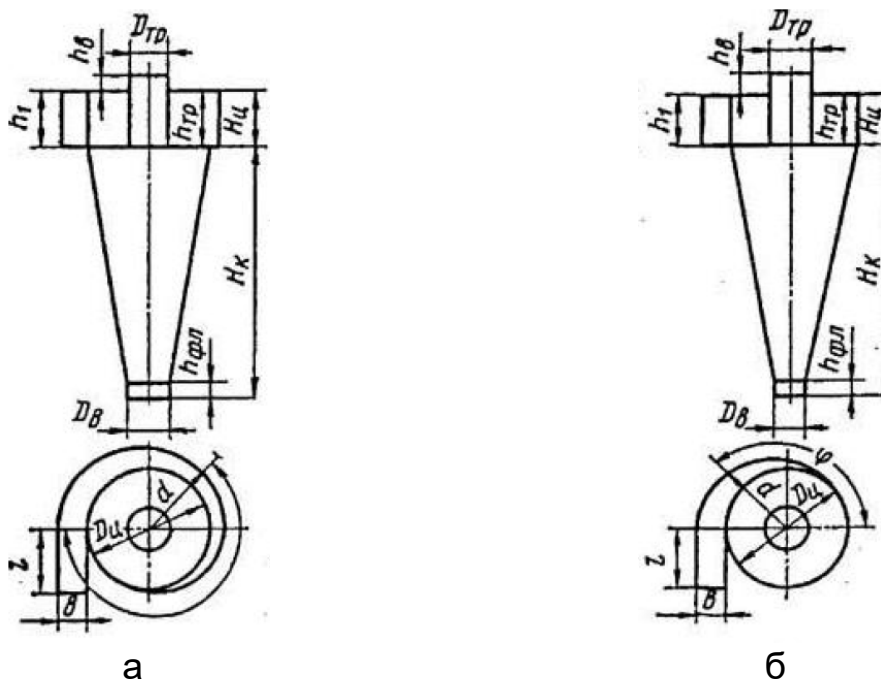


Рисунок 2.5 – Конічний циклон [1]: а – з тангенційним вводом; б – з уліточним вводом

До конічних відносяться циклони типу СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 та СК-ЦН-22 (рис. 2.5, табл. 2.6) [1]. Вони характеризуються довгою конічною частиною, спіральним вхідним патрубком та малим відношенням діаметрів вихлопної труби та корпусу циклонів відповідно 0,33; 0,34 та 0,22. Циклон типу СК-ЦН-22 застосовується для уловлення пилу, що відрізняється підвищеною абразивністю та схильністю до злипання. Втрати тиску в цьому апараті значно вище, ніж в інших конічних циклонах. Звичайно діаметр циліндричних циклонів не перевищує 2000 мм, а конічних – 3000 мм. Задавшись типом циклона по табл. 2.3, визначаємо оптимальну швидкість газу в апараті  $v_{\text{опт}}$ .

Таблиця 2.5 – Співвідношення розмірів в долях внутрішнього діаметру D для циклонів ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У та ЦН-24 [1]

Найменування	Тип циклона			
	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	ЦН-11
Внутрішній діаметр вихлопної труби $d_{\text{тр}}$	0,59 для всіх типів			
Внутрішній діаметр пилівипускного отвору $d_1$	0,3-0,4 для всіх типів*			
Ширина вхідного патрубка в циклоні (внутрішній розмір) $b$	0,2 для всіх типів			
Ширина вхідного патрубка на вході (внутрішній розмір) $b_1$	0,26 для всіх типів			
Довжина вхідного патрубка $l$	0,6 для всіх типів			
Діаметр середньої лінії циклона $D_{\text{сер}}$	0,8 для всіх типів			
Висота встановлення фланця $h_{\text{фл}}$	0,1 для всіх типів			
Кут нахилу кришки та вхідного патрубка циклона $\alpha$ , град	15	15	24	11
Висота вхідного патрубка $a$ ( $h_1$ )	0,66	0,66	1,11	0,48
Висота вихлопної труби $h_{\text{тр}}$	1,74	1,5	2,11	1,56
Висота циліндричної частини циклона $H_{\text{ц}}$	2,26	1,51	2,11	2,06
Висота конуса циклона $H_{\text{к}}$	2	1,5	1,75	2,0
Висота зовнішньої частини вихлопної труби $h_{\text{в}}$	0,3	0,3	0,4	0,3
Загальна висота циклона $H$	4,56	3,31	4,26	4,38

Примітка. «\*» Більший розмір приймається при малих  $D$  та високій запиленості.

Розраховуємо необхідну площу перерізу циклону за формулою:

$$F = V/v_{\text{опт}}, \text{ м}^2, \quad (2.24)$$

де  $V$  – витрата газу,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Визначаємо діаметр циклона, задаючись кількістю циклонів  $N$ :

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}}, \text{ м} \quad (2.25)$$

Діаметр циклона округлюємо до величини, що рекомендується в табл. 2.6-2.8 [1].

Обчислюємо дійсну швидкість газу в циклоні за формулою:

$$v = V/(0,785 \cdot N \cdot D^2), \text{ м/с}. \quad (2.26)$$

Швидкість в циклоні не повинна відхилятися більш ніж на 15 % від оптимальної.

Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного опору циклона або групи циклонів за формулою:

$$\xi_{\text{ц}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{\text{ц}500}^{C(\Pi)} + K_3, \quad (2.27)$$

де  $\xi_{\text{ц}500}^{C(\Pi)}$  – коефіцієнт гідравлічного опору циклона діаметром 500 мм, що вибирається за табл. 2.9 [1]. Індекс “С” означає, що циклон працює в гідравлічній мережі, “П” – без мережі, тобто прямо на викид в атмосферу;

$K_1$  – поправочний коефіцієнт на діаметр циклона, що визначається за табл. 2.10 [1];

$K_2$  – поправочний коефіцієнт на запиленість газів, що визначається за табл. 2.11 [1];

$K_3$  – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, пов’язані з компоновкою циклонів в групу та визначається за табл. 2.12 [1].

Таблиця 2.6 – Співвідношення розмірів в долях внутрішнього діаметру  $D$  для циклонів СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 та СК-ЦН-34М [1]

Найменування	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Внутрішній діаметр циліндричної частини $D_{\text{ц}}$	> 3000 мм		> 4000 мм
Висота циліндричної частини циклона $H_{\text{ц}}$	0,535	0,515	0,4

Найменування	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Висота конічної частини циклона $H_k$	3,0	2,110	2,6
Внутрішній діаметр вихлопної труби $d$	0,334	0,340	0,22
Внутрішній діаметр пиловипускного отвору $d_1$	0,334	0,229	0,18
Ширина вхідного патрубку в циклоні $b$	0,264	0,214	0,18
Висота зовнішньої частини вихлопної труби $h_b$	0,2-0,3	0,515	0,3
Висота встановлення фланця $h_{фл}$	0,1	0,1	0,1
Висота вхідного патрубку $h_1$	0,535	0,2-0,3	0,4
Довжина вхідного патрубку $l$	0,6	0,6	0,6
Висота заглиблення вихлопної труби $h_{тр}$	0,535	0,515	0,4
Радіус "улітки" $r$	$D/2+b\phi/2\pi$	$D/2+b\phi/\pi$	

Примітка. «\*» "Равлик" – пристрій, що встановлюється на вихідній трубі для випрямлення газового потоку.

Таблиця 2.7 – Технічна характеристика типорозмірного ряду циклонів ЦН-15 [1]

Типорозмір циклона*	Площа перерізу циліндричної частини корпусу (групи корпусів), $m^2$	Продуктивність, $m^3/год$		Робочий об'єм бункеру, $m^3$	Вага, кг
		при $v = 2,5$ м/с	при $v = 3,5$ м/с		
ЦН-15-300П	0,070	612	864	0,17	208
ЦН-15-400П	0,125	1123	1573	0,146	275
ЦН-15-500П	0,196	1764	2470	0,205	385
ЦН-15-600П	0,282	2538	3553	0,327	520
ЦН-15-700П	0,384	3450	4838	0,465	660
ЦН-15-800П	0,502	4518	6325	0,56	825
ЦН-15-900П	0,635	5713	8000	0,64	1010
ЦН-15-1000П	0,785	7063	9889	0,72	1195
ЦН-15-1200П	1,130	10152	14220	1,07	1630
ЦН-15-1400П	1,538	13842	19378	1,42	2180
ЦН-15-300×2УП	0,140	1224	1728	0,2	277
ЦН-15-300×2СП	0,140	1224	1728	0,2	307
ЦН-15-400×2УП	0,250	2246	3146	0,31	456
ЦН-15-400×2СП	0,250	2246	3146	0,31	475
ЦН-15-500×2УП	0,392	3528	4940	0,5	680
ЦН-15-500×2СП	0,392	3528	4940	0,5	675
ЦН-15-600×2УП	0,564	5076	7106	0,595	890
ЦН-15-600×2СП	0,564	5076	7106	0,595	870
ЦН-15-700×2УП	0,768	6900	9676	0,825	1140
ЦН-15-700×2СП	0,768	6900	9676	0,825	1110
ЦН-15-800×2УП	1,004	9036	12650	1,15	1475
ЦН-15-800×2СП	1,004	9036	12650	1,15	1430
ЦН-15-900×2УП	1,270	11426	15998	1,45	1830
ЦН-15-900×2СП	1,270	11426	15998	1,45	1760
ЦН-15-400×4УП	0,500	4492	6992	0,54	850
ЦН-15-400×4СП	0,500	4492	6992	0,54	840
ЦН-15-500×4УП	0,784	7056	9880	0,77	1225
ЦН-15-500×4СП	0,784	7056	9880	0,77	1165
ЦН-15-600×4УП	1,128	10152	14212	1,11	1700
ЦН-15-600×4СП	1,128	10152	14212	1,11	1615
ЦН-15-700×4УП	1,536	13800	19352	1,5	2210
ЦН-15-700×4СП	1,536	13800	19352	1,5	2130
ЦН-15-800×4УП	2,008	18072	25300	2,27	2870
ЦН-15-800×4СП	2,008	18072	25300	2,27	2760
ЦН-15-900×4УП	2,540	22852	31996	2,28	3610
ЦН-15-900×4СП	2,540	22852	31996	2,28	3450
ЦН-15-500×6УП	1,176	10584	14820	1,3	1960

Типорозмір циклона*	Площа перерізу циліндричної частини корпусу (групи корпусів), м <sup>2</sup>	Продуктивність, м <sup>3</sup> /год		Робочий об'єм бункеру, м <sup>3</sup>	Вага, кг
		при v = 2,5 м/с	при v = 3,5 м/с		
ЦН-15-500×6СП	1,176	10584	14820	1,3	1900
ЦН-15-600×6УП	1,692	15228	21318	2,0	2720
ЦН-15-600×6СП	1,692	15228	21318	2,0	2640
ЦН-15-700×6УП	2,304	20700	29028	2,67	3550
ЦН-15-700×6СП	2,304	20700	29028	2,67	3430
ЦН-15-800×6УП	3,012	27108	37950	3,82	4640
ЦН-15-800×6СП	3,012	27108	37950	3,82	4440
ЦН-15-900×6УП	3,810	34278	47994	5,55	5810
ЦН-15-900×6СП	3,810	34278	47994	5,55	5580
ЦН-15-500×8УП	1,568	14112	19760	2,33	2720
ЦН-15-500×8СП	1,568	14112	19760	2,33	2640
ЦН-15-1400	1,538	17000-20000		-	2,418
ЦН-15-1800	2,543	28000-32000		-	3,949
ЦН-15-2000	3,140	32000-38000		-	5,163

Примітка. «\*» ЦН-15 –  $D_{\text{цикл}} \times N_{\text{цикл}}$ , де N – кількість циклонів в груповому циклоні;

ЦН-15-900×6УП – циклон: індекс типу циклона (15); діаметр циліндричної частини 900 мм; кількість циклонних елементів 6 шт.; чисте повітря виходить через збірник у формі «равлику» (У); бункер пірамідальний (П);

ЦН-15-900×6СП – циклон: індекс типу циклона (15); діаметр циліндричної частини 900 мм; кількість циклонних елементів 6 шт.; чисте повітря виходить через збірник у формі коробки (С); бункер пірамідальний (П);

Приклад умовного позначення циклону: ЦН-15/МЧ-800-Пр-1УП-1-s2 – циклон: індекс типу циклона (15/МЧ); діаметр циліндричної частини 800 мм; правого обертання (Пр); чисте повітря виходить через збірник у формі «равлику» (У); бункер пірамідальний (П); циклон виготовлено з вуглецевої сталі, товща матеріалу 2 мм (s2).

Приклад умовного позначення циклону: ЦН-15/МЧ-300-2СП-2(12Х17)-s2 – циклон: індекс типу циклона (15/МЧ); діаметр циліндричної частини 300 мм; кількість циклонних елементів (2 шт.); чисте повітря виходить через збірник у формі коробки (С); бункер пірамідальний (П); циклон виготовлено з нержавіючої сталі (2), марки 12Х17, товща матеріалу 2 мм (s2);

Приклад умовного позначення циклону: ЦН-15/МЧ-600-8УЦ-1-s4 – циклон: індекс типу циклона (15/МЧ); діаметр циліндричної частини 600 мм; кількість циклонних елементів (8 шт.); чисте повітря виходить через збірник у формі «равлику» (У); бункер циліндричний (Ц); циклон виготовлено з вуглецевої сталі звичайної якості (1), товща матеріалу 4 мм (s4).

Таблиця 2.8 – Рекомендації по компоновці циклонів типу ЦН в групи [1]

Діаметр циклона, мм	Кількість циклонів в групі при компоновці*						
	прямокутній				круговий		
	2	4	6	8	10	12	14
200	П	П	П	П	-	-	-
300	О	О	О	О	-	-	-
400	П	П	П	П	-	-	-
500	О	О	О	О	-	-	-
600	П	П	П	П	П	П	П
700	О	О	О	О	-	-	-
800	П	П	П	П	П	П	П
900	П	П	П	П	-	-	-
1000	П	П	П	П	П	П	П
1200	П	П	-	-	-	-	-
1400	П	П	-	-	-	-	-
1600	П	П	-	-	-	-	-
1800	П	П	-	-	-	-	-

Примітка. \*П – групи, що рекомендовані до застосування; О – групи обмеженого застосування. Для груп з двох та чотирьох циклонів застосовують круглу або прямокутну форму пилових бункерів, з шести та восьми – тільки прямокутну.

Таблиця 2.9 – Значення коефіцієнтів опору циклонів ( $D = 500$  мм;  $v = 3$  м/с) [1]

Тип циклона	d/D	Без додаткових пристроїв		З кільцевим дифуззором		З вихідним «равликом», $\xi_{ц}^C$	З відводом $90^\circ$ R/d = 1,5	
		$\xi_{ц}^C$	$\xi_{ц}^П$	$\xi_{ц}^C$	$\xi_{ц}^П$		l/d = 0÷12	
							$\xi_{ц}^C$	$\xi_{ц}^C$
ЦН-11	0,59	245	250	207	215	235	245	250
ЦН-15	0,59	155	163	132	140	150	155	160
ЦН-15У	0,59	165	170	140	148	158	165	170
ЦН-24	0,59	75	80	64	70	73	75	80
СДК-ЦН-33	0,33	520	600	-	-	500	-	560
СК-ЦН-34	0,34	1050	1150	-	-	-	-	-
СК-ЦН-34М	0,22	-	2000	-	-	-	-	-

Таблиця 2.10 – Поправочний коефіцієнт  $K_1$  на діаметр циклона [1]

Діаметр циклона, мм	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М
150	0,94	0,85	1,0
200	0,95	0,90	1,0
300	0,96	0,93	1,0
400	0,99	1,0	1,0
500	1,0	1,0	1,0

Таблиця 2.11 – Значення поправочних коефіцієнтів  $K_2$  на запиленість газів ( $D = 500$  мм) [1, 3]

Тип циклона	Поправочний коефіцієнт при запиленості газу, г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90

Тип циклона	Поправочний коефіцієнт при запиленості газу, г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Таблиця 2.12 – Коефіцієнт  $K_3$ , що враховує додаткові втрати тиску, пов'язані з компоновкою циклонів в групу [1]

Характеристика групового циклона	Значення коефіцієнта
Кругова компоновка, нижній організований підвід	60
Прямокутна компоновка, організований підвід, циклонні елементи розташовані в одній площині	35
Те ж, але "уліточний" відвід з циклонних елементів	28
Прямокутна компоновка, вільний підвід потоку в загальну камеру	60
Для одиночних циклонів	0

Визначаємо втрати тиску в циклоні, виходячи з формули:

$$\Delta P = \xi_{\text{ц}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} v^2}{2}, \text{ Па} \quad (2.28)$$

Якщо втрати тиску є прийнятними, переходимо до розрахунку повного коефіцієнту очищення газу в циклоні. При цьому приймається, що коефіцієнт очищення газу в одиночному циклоні та в групі циклонів однаковий. В дійсності, коефіцієнт очищення газу в групі циклонів може бути нижчий, ніж в одиночному циклоні. Це пояснюється можливістю виникнення перетоків газу через загальний бункер, що зменшує коефіцієнт очищення газу в групі циклонів [1].

Використовуючи дані з табл. 2.3, зокрема значення  $d_{\eta=50}^T$ , розраховуємо еквівалентний діаметр часток  $d_{\eta=50}$ , що вловлюються в циклоні з ефективністю 50 % при робочих умовах, виходячи з рівняння:

$$d_{\eta=50} = d_{\eta=50}^T \cdot \sqrt{\frac{D}{D_T}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\mu_T}} \cdot \sqrt{\frac{v}{v_T}}, \text{ мкм} \quad (2.29)$$

- де  $D$  – діаметр циклона, м;  
 $\rho$  – густина часток пилу, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – динамічна в'язкість газу, Н·с/м<sup>2</sup>;  
 $v$  – швидкість газу в циклоні, м/с

Значення величин з індексом "Т" відповідає еталонним умовам, визначеним в табл. 2.3.

Враховуючи, що уловлення часток пилу підпорядковується логарифмічно нормальному розподілу, потрібно визначити параметр "х" функції розподілу  $\Phi(x)$  [1]:

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{\eta=50}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_{\eta}^T}}, \quad (2.30)$$

- де  $d_m$  – медіанний діаметр часток пилу (діаметр, при якому кількість часток більше  $d_m$  дорівнює кількості часток менше  $d_m$ ), мкм;
- $\lg \sigma$  – ступінь полідисперсності пилу;
- $\lg \sigma_{\eta}^T$  – значення параметру з табл. 2.3;
- $\sigma$  – стандартне відхилення, що характеризує дисперсний склад пилу

$\Phi(x)$  знаходимо з таблиці нормальної функції розподілу (табл. 2.13), де інтеграл табульований в межах від 0 до  $x$ .

Таблиця 2.13 – Значення нормальної функції розподілу (інтеграла вірогідності) [1]

$$\Phi(x) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,0080	0,61	0,4581	1,21	0,7737	1,81	0,9297
0,02	0,0160	0,62	0,4647	1,22	0,7775	1,82	0,9312
0,03	0,0239	0,63	0,4713	1,23	0,7813	1,83	0,9328
0,04	0,0319	0,64	0,4778	1,24	0,7850	1,84	0,9342
0,05	0,0399	0,65	0,4843	1,25	0,7887	1,85	0,9357
0,06	0,0478	0,66	0,4907	1,26	0,7923	1,86	0,9371
0,07	0,0558	0,67	0,4971	1,27	0,7959	1,87	0,9385
0,08	0,0638	0,68	0,5035	1,28	0,7995	1,88	0,9399
0,09	0,0717	0,69	0,5098	1,29	0,8029	1,89	0,9412
0,10	0,0797	0,70	0,5161	1,30	0,8064	1,90	0,9426
0,11	0,0876	0,71	0,5223	1,31	0,8098	1,91	0,9439
0,12	0,0955	0,72	0,5285	1,32	0,8132	1,92	0,9451
0,13	0,1034	0,73	0,5346	1,33	0,8163	1,93	0,9464
0,14	0,1113	0,74	0,5407	1,34	0,8198	1,94	0,9476
0,15	0,1192	0,75	0,5467	1,35	0,8230	1,95	0,9488
0,16	0,1271	0,76	0,5527	1,36	0,8262	1,96	0,9500
0,17	0,1350	0,77	0,5587	1,37	0,8293	1,97	0,9512
0,18	0,1428	0,78	0,5646	1,38	0,8324	1,98	0,9523
0,19	0,1507	0,79	0,5705	1,39	0,8355	1,99	0,9534
0,20	0,1585	0,80	0,5763	1,40	0,8385	2,00	0,9545
0,21	0,1663	0,81	0,5821	1,41	0,8415	2,05	0,9596
0,22	0,1741	0,82	0,5878	1,42	0,8444	2,10	0,9643
0,23	0,1819	0,83	0,5935	1,43	0,8475	2,15	0,9684
0,24	0,1897	0,84	0,5991	1,44	0,8501	2,20	0,9722
0,25	0,1974	0,85	0,6047	1,45	0,8529	2,25	0,9756
0,26	0,2051	0,86	0,6102	1,46	0,8557	2,30	0,9786
0,27	0,2128	0,87	0,6157	1,47	0,8554	2,35	0,9812
0,28	0,2205	0,88	0,6211	1,48	0,8611	2,40	0,9836
0,29	0,2282	0,89	0,6265	1,49	0,8638	2,45	0,9857
0,30	0,2358	0,90	0,6319	1,50	0,8664	2,50	0,9876
0,31	0,2434	0,91	0,6372	1,51	0,8690	2,55	0,9892
0,32	0,2510	0,92	0,6424	1,52	0,8715	2,60	0,9907

x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)
1	2	3	4	5	6	7	8
0,33	0,2586	0,93	0,6475	1,53	0,8740	2,65	0,9920
0,34	0,2661	0,94	0,6528	1,54	0,8764	2,70	0,9931
0,35	0,2737	0,95	0,6579	1,55	0,8789	2,75	0,9940
0,36	0,2812	0,96	0,6629	1,56	0,8812	2,80	0,9949
0,37	0,2886	0,97	0,6680	1,57	0,8836	2,85	0,9956
0,38	0,2961	0,98	0,6729	1,58	0,8859	2,90	0,9963
0,39	0,3035	0,99	0,6778	1,59	0,8882	2,95	0,9968
0,40	0,3108	1,00	0,6827	1,60	0,8904	3,00	0,9973
0,41	0,3182	1,01	0,6875	1,61	0,8926	3,10	0,99806
0,42	0,3255	1,02	0,6923	1,62	0,8948	3,20	0,99863
0,43	0,3328	1,03	0,6970	1,63	0,8969	3,30	0,99903
0,44	0,3401	1,04	0,7017	1,64	0,8990	3,40	0,99933
0,45	0,3473	1,05	0,7063	1,65	0,9011	3,50	0,99953
0,46	0,3545	1,06	0,7109	1,66	0,9031	3,60	0,99968
0,47	0,3616	1,07	0,7154	1,67	0,9051	3,70	0,99978
0,48	0,3688	1,08	0,7199	1,68	0,9070	3,80	0,99986
0,49	0,3759	1,09	0,7243	1,69	0,9090	3,90	0,99990
0,50	0,3829	1,10	0,7287	1,70	0,9109	4,00	0,99994
0,51	0,3899	1,11	0,7330	1,71	0,9127	4,417	0,99999
0,52	0,3969	1,12	0,7373	1,72	0,9146	4,892	0,999999
0,53	0,4039	1,13	0,7415	1,73	0,9164	5,327	0,9999999
0,54	0,4108	1,14	0,7457	1,74	0,9181		
0,55	0,4177	1,15	0,7499	1,75	0,9199		
0,56	0,4245	1,16	0,7540	1,76	0,9216		
0,57	0,4313	1,17	0,7580	1,77	0,9233		
0,58	0,4381	1,18	0,7620	1,78	0,9246		
0,59	0,4448	1,19	0,7660	1,79	0,9263		
0,60	0,4515	1,20	0,7699	1,80	0,9281		

Загальну ефективність вловлювання часток в циклоні визначаємо за рівнянням:  $\eta = 50 (1 + \Phi(x))$ , %.

В разі необхідності визначення фракційних ступенів очищення для кожної фракції, використовуючи фракційний діаметр часток замість медіанного та приведену вище формулу для визначення параметру “x”, знаходимо  $\Phi(x)_i$  та ступінь очищення для кожної фракції  $\eta_i$ . Знаючи величину  $\eta_i$  та масовий вміст фракції  $\Phi_i$  (в %) в складі пилу, можна визначити загальну ефективність очищення газу від пилу по залежності:

$$\eta = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \eta_i \Phi_i, \% \quad (2.31)$$

Після закінчення розрахунків отримане значення  $\eta$  співставляють з потрібним для технологічної схеми. Якщо  $\eta$  виявляється менше потрібного, необхідно вибрати інший тип циклона, з більшим значенням коефіцієнта гідравлічного опору. Для орієнтовних підрахунків необхідного значення  $\xi_u$  рекомендується наступна залежність:

$$\xi_{ц2} = \xi_{ц1} \left( \frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} \right) \cdot \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{D_2}{D_1}, \quad (2.32)$$

де індекс “1” відноситься до розрахованих, а індекс “2” – до потрібних параметрів циклона.

### 2.4.1 Приклад розрахунку та вибору циклону

Задача (приклад)

Вхідні параметри [1]:

- витрата газу  $V = 44000 \text{ м}^3/\text{год.}$ ;
- запыленість газу  $C_{\text{поч}} = 30 \text{ г}/\text{м}^3$ ;
- щільність газу  $\rho_r = 1,38 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- динамічна в'язкість газу  $\mu = 15,28 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ ;
- густина часток  $\rho = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- стандартне відхилення  $\sigma = 3,5$ ;
- медіанний діаметр  $d_m = 15 \text{ мкм}$ ;
- склад пилу в газі перед циклоном:

Дчасток, мкм	5	10	15	25	50
Фракційний вміст часток $\Phi_i$ , %	12	18	40	22	8

Довідково: де  $d_m$  – медіанний діаметр часток пилу (діаметр, при якому кількість часток більше  $d_m$  дорівнює кількості часток менше  $d_m$ ), мкм

Рішення

Задавшись за табл. 2.3 типом циклона ЦН-15, приймаємо оптимальну швидкість газу в апараті  $v_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м}/\text{с}$  [1].

Розраховуємо необхідну площу перерізу циклона, за формулою (2.24):

$$F = \frac{V}{v_{\text{опт}}} = \frac{44000 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}}{3,5 \cdot 3600} = 3,49 \text{ м}^2, \quad (2.24)$$

Визначаємо діаметр циклона, задаючись кількістю циклонів  $N=1$  за формулою (2.25):

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}} = \sqrt{\frac{3,49 \text{ м}^2}{0,785 \cdot 1}} = 2,11 \text{ м} = 2110 \text{ мм} \approx 2400 \text{ мм}$$

Знайдене значення  $D$  округляємо до величин: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000 мм. Якщо розрахунковий діаметр перевищує його максимально допустиме значення, то необхідно застосувати декілька  $N$ , паралельно встановлених циклонів [3].

Задля підвищення надійності технологічного циклу, за можливості, передбачають не менше 2 ГОУ.

Визначаємо діаметр циклона, задаючись кількістю циклонів  $N=6$  за формулою (2.25):

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}} = \sqrt{\frac{3,49 \text{ м}^2}{0,785 \cdot 6}} = 0,86 \text{ м}$$

В даному випадку, діаметр циклона округлюємо за табл. 2.7-2.8 до  $D = 0,9 \text{ м} = 900 \text{ мм}$ .

За вибраним діаметром циклону знаходимо дійсну швидкість газу в групі циклонів (або в циклоні у разі обрання попередньо лише одного ГОУ, а не групи) за формулою (2.26):

$$v = \frac{V}{0,785 \cdot N \cdot D^2} = \frac{44000 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}}{3600 \cdot 0,785 \cdot 6 \cdot 0,9^2} = 3,2 \text{ м/с.}$$

Швидкість в циклоні не повинна відхилитись більш ніж на 15 % від оптимальної [1, 3]. Складаємо пропорцію:

$$v_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м/с} - 100 \%$$

$$v = 3,2 \text{ м/с} - x \%$$

$$x = \frac{3,2 \cdot 100}{3,5} = 91,4 \%$$

$$\Delta = 100 \% - 91,4 \% = 8,6 \% < 15 \%,$$

тоді розрахована швидкість газу не відхиляється від норми [1, 3].

Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного опору групи циклонів за табл. 2.9-2.12, враховуючи, що запыленість газу  $C_{\text{поч}} = 30 \text{ г/м}^3$  та приймаючи, що апарат працює в гідравлічній мережі без додаткових пристроїв; циклонні елементи розташовані в одній площині прямокутно з організованим підводом газу (див. формулу (2.27)):

$$\xi_{\text{ц}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{\text{ц}500}^{C(\Pi)} + K_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{\text{ц}500}^C + K_3 = 1,0 \cdot 0,915 \cdot \frac{155 + 35}{176,8}$$

- де  $\xi_{\text{ц}500}^C$  – коефіцієнт гідравлічного опору циклона діаметром 500 мм, що вибирається за табл. 2.9. Індекс “С” означає, що циклон працює в гідравлічній мережі ( $\xi_{\text{ц}500}^C = 155$ );  
 $K_1$  – поправочний коефіцієнт на діаметр циклона, що

- визначається за табл. 2.10 ( $K_1 = 1,0$ );
- $K_2$  – поправочний коефіцієнт на запиленість газів, що визначається за табл. 2.11 ( $K_2 = (0,92+0,91)/2 = 0,915$ );
- $K_3$  – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, пов'язані з компоновкою циклонів в групу та визначається за табл. 2.12 ( $K_3 = 35$ ).

Визначаємо втрати тиску в групі циклонів, якщо щільність газу  $\rho_r = 1,38 \text{ кг/м}^3$  (див. вихідні дані) за формулою (2.28):

$$\Delta P = \xi_{\text{ц}} \cdot \frac{\rho_r v^2}{2} = 176,8 \cdot \frac{1,38 \cdot 3,2^2}{2} = 1249 \text{ Па}$$

Якщо втрати тиску  $\Delta P$  виявилися допустимими ( $\Delta P_{\text{доп}} \leq 2500 \text{ Па}$ ), переходимо до розрахунку повного опору очищення газу в циклоні. При цьому приймається, що коефіцієнт очищення газів в одиночному циклоні та в групі циклонів однаковий. В дійсності коефіцієнт очищення газів в групі циклонів може виявитися трохи нижчий, ніж в одиночному циклоні. Це пояснюється можливістю виникнення перетікання газу через загальний бункер, що знижує коефіцієнт очищення газів в групі циклонів [3].

В даному випадку приймаємо, що втрати тиску є прийнятними для вибраної технологічної схеми.

Розраховуємо еквівалентний діаметр часток, що вловлюються в циклоні з ефективністю 50 % при робочих умовах, враховуючи динамічну в'язкість газу  $\mu = 15,28 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$ , густину часток  $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$  (див. вихідні дані), дані з табл. 2.3 за формулою (2.29):

$$d_{\eta=50} = d_{\eta=50}^T \cdot \sqrt{\frac{D}{D_T}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\mu_T}} \cdot \sqrt{\frac{v}{v_T}} = 4,5 \text{ мкм} \cdot \sqrt{\frac{0,9 \text{ м}}{0,6 \text{ м}}} \cdot \sqrt{\frac{1930 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{2400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}} \cdot \sqrt{\frac{15,28 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}}{22,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}}} \cdot \sqrt{\frac{3,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{3,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 4,5 \cdot 1,22 \cdot 0,90 \cdot 0,83 \cdot 1,05 = 4,3 \text{ мкм}$$

де  $D = 0,6 \text{ м}$  – діаметр циклона, м (див. примітку до табл. 2.3);  $\rho = 1930 \text{ кг/м}^3$  – густина часток пилу,  $\text{кг/м}^3$  (див. примітку до табл. 2.3);  $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$  – динамічна в'язкість газу,  $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$  (див. примітку до табл. 2.3);  $v = 3,5 \text{ м/с}$  – швидкість газу в циклоні,  $\text{м/с}$  (див. примітку до табл. 2.3). Значення величин з індексом "Т" відповідає еталонним умовам, визначеним в табл. 2.3.  $d_{\eta=50}^T = 4,50 \text{ мкм}$  (див. табл. 2.3).

Визначаємо параметр "х" функції розподілу  $\Phi(x)$  за формулою (2.30):

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{\eta=50}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_{\eta}^T}} = \frac{\lg \frac{15}{4,3}}{\sqrt{\lg^2 3,5 + \lg^2 0,352}} = 0,76,$$

- де  $d_m$  – медіанний діаметр часток пилу (діаметр, при якому кількість часток більше  $d_m$  дорівнює кількості часток менше  $d_m$ ), мкм;  
 $\lg \sigma$  – ступінь полідисперсності пилу;  
 $\lg \sigma_{\eta}^T$  – значення параметру з табл. 2.3;  
 $\sigma$  – стандартне відхилення, що характеризує дисперсний склад пилу (див. вихідні дані)

$\Phi(x)$  знаходимо з таблиці нормальної функції розподілу (табл. 2.13), де інтеграл табульований в межах від 0 до  $x$ . За табл. 2.13  $\Phi(x) = 0,5527$ , тоді загальна ефективність пиловловлювання в циклоні:

Загальну ефективність вловлювання часток в циклоні визначаємо за рівнянням:  $\eta = 50 (1 + \Phi(x)) = 50 (1 + 0,5527) = 77,6 \%$ .

Визначаємо ступені очищення по фракціям:

d	5	10	15	25	50
x	0,09	0,52	0,76	1,08	1,50
$\Phi(x)$	0,0717	0,3969	0,5527	0,7199	0,8664
$\eta, \%$	53,6	69,9	77,6	86,0	93,3

Тоді загальна ефективність очищення газу від пилу по залежності від фракційного вмісту часток визначають за формулою (2.31):

$$\eta = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \eta_i \Phi_i = \frac{1}{100} \sum_{i=5}^n (53,6 \cdot 12 + 69,9 \cdot 18 + 77,6 \cdot 40 + 86,0 \cdot 22 + 93,3 \cdot 8) = 76,5 \%$$

де  $\Phi_i$  – фракційний вміст часток  $\Phi_i, \%$  (див. вихідні дані)

Виходячи з витрати газу, діаметра та кількості циклонів обираємо по табл. 2.7 групу з шести циклонів ЦН-15-900х6УП; площа перерізу корпусів складає 3,81 м<sup>2</sup>; робочий об'єм бункеру для збору пилу – 5,55 м<sup>3</sup>; вага – 5810 кг.

## 2.5 Завдання № 1

Слід визначити розміри пилоосаджувальної камери. Вихідні дані: щільність газу  $\rho_r = 1,38$  кг/м<sup>3</sup>; стандартне відхилення  $\sigma = 3,5$ ; інші дані наведені табл. 2.14. Приклад розв'язання завдання наведено в п.п. 2.2.1 «Приклад визначення розмірів пилоосаджувальної камери».

Таблиця 2.14 – Вихідні дані до завдання № 1 за варіантами

№ варіанту	Витрата газу V, тис. м <sup>3</sup> /год	Діаметр d <sub>ч</sub> , мкм	Щільність часток пилу ρ, кг/м <sup>3</sup>	Динамічна в'язкість газу μ·10 <sup>-6</sup> , Н·с/м <sup>2</sup>
0 (приклад)	30	80	2500	20,8
1	31	85	2500	20,7
2	32	83	2550	20,6
3	33	82	2450	20,5
4	34	81	2490	20,4
5	35	79	2480	20,3
6	36	78	2560	20,2
7	37	77	2520	20,1
8	38	76	2600	19,9
9	39	75	2620	19,8
10	40	74	2610	19,7
11	41	73	2510	19,6
12	42	72	2580	19,5
13	43	71	2570	19,4
14	44	70	2540	19,3
15	45	69	2560	19,2
16	46	65	2530	20,5
17	47	67	2450	20,4
18	48	66	2460	20,3
19	49	64	2430	20,2
20	50	63	2410	20,1
21	51	61	2480	19,9
22	52	62	2470	19,8
23	53	60	2490	19,7
24	54	59	2460	19,6
25	55	88	2410	19,5

## 2.6 Завдання № 2

Розрахуйте основні параметри та виберіть типорозмір циклону. Вихідні дані: щільність газу  $\rho_r = 1,38 \text{ кг/м}^3$ ; динамічна в'язкість газу  $\mu = 15,28 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ ; стандартне відхилення  $\sigma = 3,5$ ; інші дані наведені табл. 2.15. Приклад розв'язання завдання наведено в п.п. 2.4.1 «Приклад розрахунку та вибору циклону».

Таблиця 2.15 – Вихідні дані до завдання № 2 за варіантами

№ варіанту	Витрата газу V, м <sup>3</sup> /год	Запиленість газу C <sub>поч</sub> , г/м <sup>3</sup>	Густина часток ρ, кг/м <sup>3</sup>	Медіанний діаметр d <sub>m</sub> , мкм	Склад пилу в газі перед циклоном: D <sub>часток</sub> , мкм				
					5	10	15	25	50
0 (приклад)	44000	30	2400	15	Фракційний вміст часток Φ <sub>i</sub> , %				
					12	18	40	22	8
1	46200	33	2410	15	13	17	40	20	10
2	48510	31	2169	15	14	16	40	21	9
3	97020	36	2531	15	15	15	40	22	8
4	92400	34	2277	15	16	14	40	23	7
5	97020	40	2657	15	13	17	40	24	6
6	30800	38	2391	15	12	18	40	23	7
7	32340	42	2391	15	11	19	40	18	12
8	64680	40	2152	15	10	20	40	17	13
9	61600	41	2511	15	9	21	40	14	16
10	64680	39	2260	15	8	22	40	15	15
11	20533	40	2636	15	7	23	40	16	14

№ варіанту	Витрата газу V, м <sup>3</sup> /год	Запиленість газу C <sub>поч</sub> , г/м <sup>3</sup>	Густина часток ρ, кг/м <sup>3</sup>	Медіанний діаметр d <sub>m</sub> , мкм	Склад пилу в газі перед циклоном: D <sub>часток</sub> , мкм				
					5	10	15	25	50
12	21560	44	2373	15	6	24	40	21	9
13	43120	39	2241	15	7	23	40	22	8
14	67760	37	2017	15	8	22	40	23	7
15	43120	39	2353	15	9	21	40	24	6
16	30800	37	2118	15	10	20	40	23	7
17	32340	38	2471	15	11	19	40	18	12
18	64680	45	2224	15	12	18	40	17	13
19	101640	37	2594	15	13	17	40	14	16
20	64680	35	2335	15	16	14	40	15	15
21	46200	36	2464	15	15	15	40	18	12
22	48510	47	2218	15	14	16	40	17	13
23	97020	36	2588	15	13	17	40	14	16
24	152460	34	2329	15	12	18	40	15	15
25	97020	35	2717	15	11	19	40	16	14

### Питання для самоперевірки

1. Що показує матеріальний баланс очисних споруд?
2. Яке основне призначення пилоосаджувальної камери?
3. Які типи циклонів Вам відомі?
4. Який принцип дії очищення пилогазового потоку покладено в основу циклонних апаратів?
5. За яких умов обирають групові циклони, а не одиничні?

### Перелік рекомендованих джерел

1. Технологія та обладнання захисту атмосфери : методичні вказівки до виконання курсових проектів / укладач О. І. Іваненко. Київ : ТОВ „Інфодрук”, 2012. 107 с.
2. Проскуріна І. В. Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище від пилових викидів металургійної промисловості : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01. Суми, 2011. 20 с.
3. Технології захисту навколишнього середовища (захист атмосфери) : підручник / В. Г. Петрук та ін. Херсон : Олді-плюс, 2019. 432 с.

## Зміст та вимоги до контрольних точок

Назва контрольної точки	Опис контрольної точки, порядок її проходження та отримання балів
Робота на практичних заняттях	<p>Практичні роботи виконуються безпосередньо на занятті, що є бажаним, однак не обов'язковим; матеріали для виконання практичної роботи доступні в записі, які зберігаються в Microsoft Teams, та викладені в повному обсязі в Moodle. Оцінка за практичну роботу виставляється за фактом виконання та враховуючи правильність розрахунків. Якщо студент виконав роботу з помилками, то за згодою з викладачем може допрацювати свої розрахунки та підвищити оцінки, але не пізніше залікового тижня.</p> <p>Оцінка за захист роботи на практичному (семінарському) занятті виставляється в Moodle наприкінці заняття або продовж доби, після заняття, та може бути оскаржена одразу ж або продовж доби, після виставлення оцінки в Moodle.</p> <p><u>Мах 6 балів:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– студент дав пряму і релевантну відповідь на поставлене питання з використанням обґрунтованого посилання на теоретичний матеріал та варіації зміни відповідь на зміну вхідних умов, в т.ч. у вигляді додаткових запитань / зміг стисло формалізувати вербально сутність проблеми за ситуацією, ідентифікувати ключові складові і пріоритети вирішення, запропонував логічне розв'язання та виконав вірно завдання і проявив організованість при оформленні розрахункової частини, а за потреби розрахунково-графічної частини (5 балів);</li> <li>– оцінка ініціативності у роботі над проблемою, логічності та структурованості відповіді, здатності комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, в т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним і самокритичним (1 бали).</li> </ul>

### Практична робота № 3

## Визначення ступеню очищення газу від пилу в рукавному фільтрі

### 3.1 Теоретичні відомості

Найбільш розповсюджені у процесі пиловловлювання такі типи рукавних фільтрів (Bag filters, BFF – англ.), як фільтри рукавні каркасні з імпульсною регенерацією рукавів (ФРКІ) та фільтри рукавні каркасні з двосторонньої імпульсної продувкою (ФРКДІ). Важливим елементом фільтру є корпус. В склад корпусу рукавних фільтрів входить бункер, кут нахилу стінок якого повинен бути більше кута природного укусу пилу, що вловлюється. У більшості апаратів кут нахилу стінок бункеру до горизонту складає 60°. У фільтрах, які використовуються для уловлення сажі та деяких інших видів пилу, що важко зсипаються, кут нахилу приймають рівним 70° [1].

В якості фільтрувальних перегородок використовують різні матеріали. Тканинні матеріали являють собою переплетіння ниток діаметром 300-700 мкм. В разі спеціальної обробки – ворсування на поверхні тканини утворюється ворс з переплутаних між собою волокон [1].

Повздовжні нитки називають основою, перетинні – утком. Основні властивості текстильних волокон тканин описані в табл. 3.1 [1].

Таблиця 3.1 – Основні властивості текстильних волокон тканин [1]

Вихідний полімер або сировина	Назва волокна	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Термостійкість, °С, при дії		Хімічна стійкість в різних середовищах*			
			довготривалій	короткочасній	кислоти	луги	окислювачі	розчинники
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Целюлоза	Хлопок	1520	65-85	90-95	ДП	Д	З	ДД
Протеїни	Шерсть	1320	95-100	120	З	ДП	З	Д
Поліамід	Капрон	1140	80-90	120	ДП	ДД	З	Д
	Номекс	1380	220	260	З	ДД	Д	Д
Полієфір	Лавсан	1380	130	160	Д	З-П	Д	Д
Поліакрилонітрил	Нітрон	1170	120	150	Д-З	З	Д	Д
Поліолефін	Поліпропілен	920	85-95	120	ДД	ДД	Д	Д
Полівинілхлорид	Хлорин	1380-1470	65-70	80-90	ДД	ДД	ДД	Д
Політетрафторетилен	Фторопласт, поліфен	2300	220	270	ДД	ДД	ДД	ДД
Поліоксидіазол	Оксалон	-	250	270	Д	-	-	-
Алюмоборосилікатне скло	Скляне волокно	2540	240	315	Д	З	ДД	ДД

Вихідний полімер або сировина	Горючість	Міцність на розрив, МПа	Подовження при розриві, %	Стойкість до стирання*	Вологоємність, %, при 20 °С	
					при φ=65 %	при φ=90- 95 %
1	10	11	12	13	14	15
Целюлоза	Так	360-530	7-8	3	7-8,5	24-27
Протеїни	Так	130-200	30-40	3	13-15	21,9
Поліамід	Так	450-600	18-32	ДД	3,5-4,5	7-8,5
	Ні	400-800	14-17	ДД	-	-
Поліефір	Так	450-700	15-25	ДД	0,4	0,5
Поліакрилонітрил	Так	300-470	15-17	3	0,9-2	4,5-5
Поліолефін	Так	440-860	22-25	ДД	0	0
Полівинілхлорид	Ні	180-230	15-30	ДП-П	0,17-0,3	0,7-0,9
Політетрафторетилен	Ні	350-400	50	3	0	0
Поліокси-діазол	-	-	-	Д	-	-
Алюмоборосилікатне скло	Ні	1600-3000	3-4	ДП	0,3	-

Примітка. «\*» ДД – дуже добра; Д – добра; З – задовільна; П – погана; ДП – дуже погана

В рукавних фільтрах типу ФРКІ забруднений газ проходить через тканину закритих знизу рукавів в напрямку ззовні всередину; очищений газ виходить через верхні відкриті кінці рукавів і видаляється з апарату. Кожен рукав закріплений на верхній решітці та натягнутий на жорсткий каркас. У фільтрів ФРКІ-30, ФРКІ-60 та ФРКІ-90, що складаються відповідно з однієї, двох та трьох секцій, висота рукавів однакова – 2 м. Кількість секцій в фільтрах ФРКІ-180 (однорядних) та ФРКІ-360 (двохрядних) складає відповідно 4 та 8, а висота рукавів – 3 м. Запилений газ подається в корпус через патрубки на бокових стінках бункерів. Виключенням є фільтр ФРКІ-360, в якому вхідний та вихідний патрубки розташовані на торцевих стінках [1].

Регенерацію проводять без відключення секцій імпульсами стисненого повітря, що подається всередину рукавів зверху через отвори в продувочних колекторах. Тривалість імпульсів – 0,1-0,2 с. Подача імпульсів забезпечується електромагнітними клапанами за допомогою системи автоматики. Система регенерації розрахована на використання стисненого повітря під тиском 0,6 МПа. Стиснуте повітря в фільтрах повинно бути осушене та очищене. Витрату повітря розраховують виходячи з режиму регенерації при витраті 55 дм<sup>3</sup> (н.у.) через одну розподільну трубу за один імпульс [1].

Корпуси та бункери виготовлені з вуглецевої сталі. Фільтрувальні матеріали: тканина лавсанова фільтрувальна, тканина лавсанова фільтрувальна, войлок голкопробивний фільтрувальний тощо. Для нормального функціонування необхідна експлуатація в опаленому приміщенні [1].

Умовне позначення типорозміру фільтру: Ф – фільтр; Р – рукавний;

К – каркасний; І – з імпульсною продувкою; цифри – площа фільтруючої поверхні в м<sup>2</sup>. На рис. 3.1-3.3 представлені різні конструкції фільтрів типу ФРКІ, а в табл. 3.2 приведена їх технічна характеристика [1].

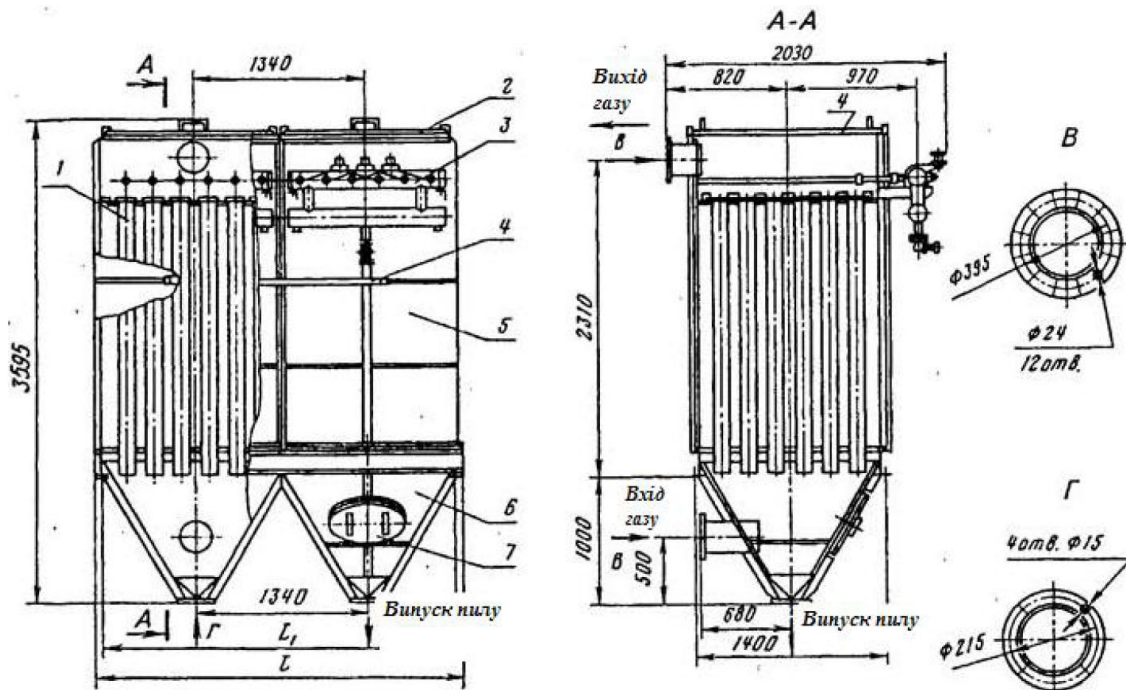


Рисунок 3.1 – Рукавні фільтри типу ФРКІ (однорядні): 1 – рукав; 2 – кришка; 3 – секція клапанів; 4 – колектор; 5 – корпус; 6 – бункер; 7 – люк [1]

Таблиця 3.2 – Технічна характеристика фільтрів типу ФРКІ [1]

Показник	Типорозмір фільтру				
	ФРКІ-30	ФРКІ-60	ФРКІ-90	ФРКІ-180	ФРКІ-360
Площа фільтруючої поверхні, м <sup>2</sup>	30	60	90	180	360
Кількість рукавів	36	72	108	144	288
Діаметр рукавів, мм	135	135	135	135	135
Висота рукавів, м	2	2	2	3	3
Кількість електромагнітів	3	6	9	12	24
Кількість мембранних клапанів	6	12	18	24	48
Кількість секцій	1	2	3	4	8
Питоме газове навантаження, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·хв, не більше	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Допустима запиленість газу, г/м <sup>3</sup>	20	20	20	20	20
Гідралічний опір, кПа	1,2-2	1,2-2	1,2-2	1,2-2	1,2-2
Тиск продувочного повітря, МПа	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6
Найбільша витрата стиснутого повітря, м <sup>3</sup> /год	10	20	30	60	120

Показник	Типорозмір фільтру				
	ФРКІ-30	ФРКІ-60	ФРКІ-90	ФРКІ-180	ФРКІ-360
Допустимий тиск всередині апарату, кПа					
Розмір L <sub>1</sub> , мм	5	5	5	5	5
Габаритні розміри, мм:					
довжина L	1300	2700	4000	5300	5300
ширина	1460	2820	4140	5480	5850
висота	2030	2030	2030	2030	4340
Маса з рукавами, т, не більше	3595	3595	3595	4520	4880
	1,28	2,06	2,99	4,58	9,86

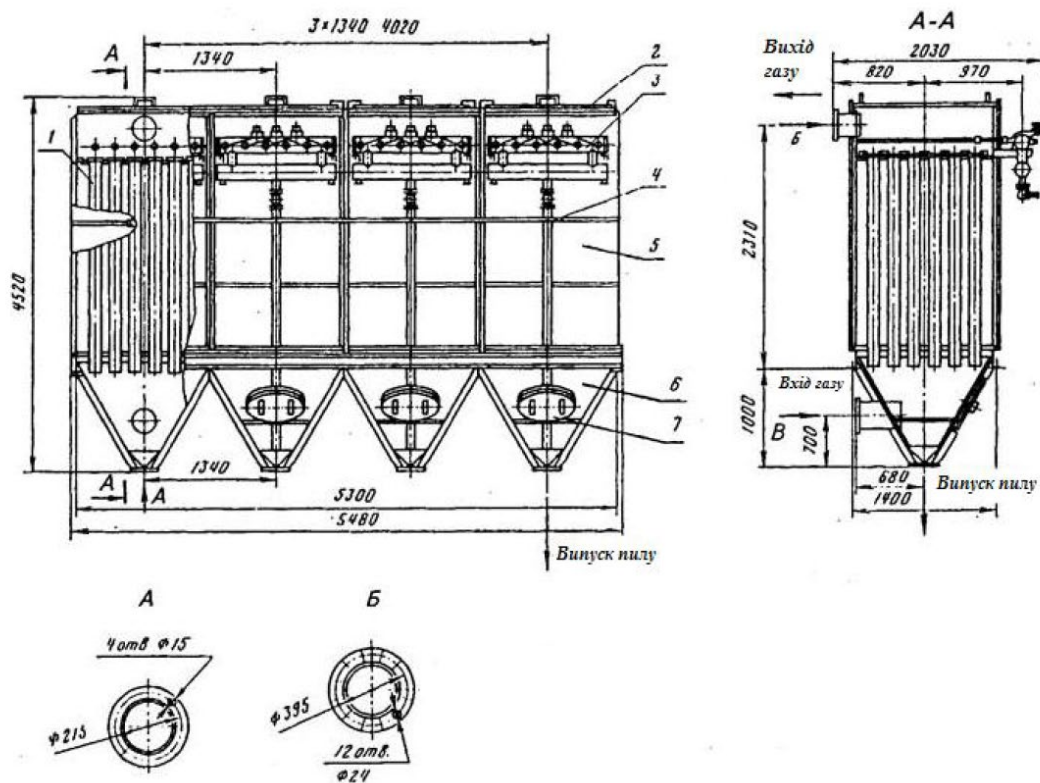


Рисунок 3.2 – Рукавні фільтри типу ФРКІ-180: 1 – рукав; 2 – кришка; 3 – секція клапанів; 4 – колектор; 5 – корпус; 6 – бункер; 7 – люк [1]

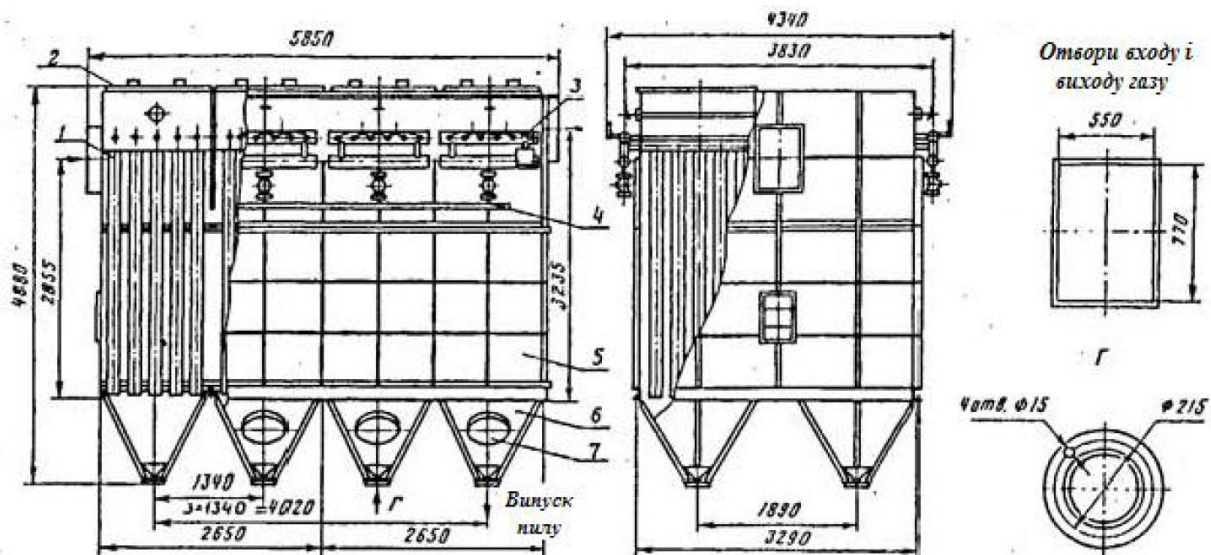


Рисунок 3.3 – Рукавні фільтри типу ФРКІ-360: 1 – рукав; 2 – кришка; 3 – секція клапанів; 4 – колектор; 5 – корпус; 6 – бункер; 7 – люк [1]

Рукавні фільтри типу ФРКДІ (рис. 3.4) використовують ті ж фільтрувальні тканини, що і ФРКІ, але функціонують при температурі забрудненого газу до 130 °С. Фільтр, який розміщений в корпусі коробчатої форми, розділений на 2 ряди секцій. В кожній секції знаходяться 36 рукавів висотою 6 м, закріплених в верхній та нижній частині. Неочищений газ поступає через торцевий колектор. Пил осаджується на зовнішній стороні рукавів і періодично скидається з них в бункер, звідки видаляється шнеками [1].

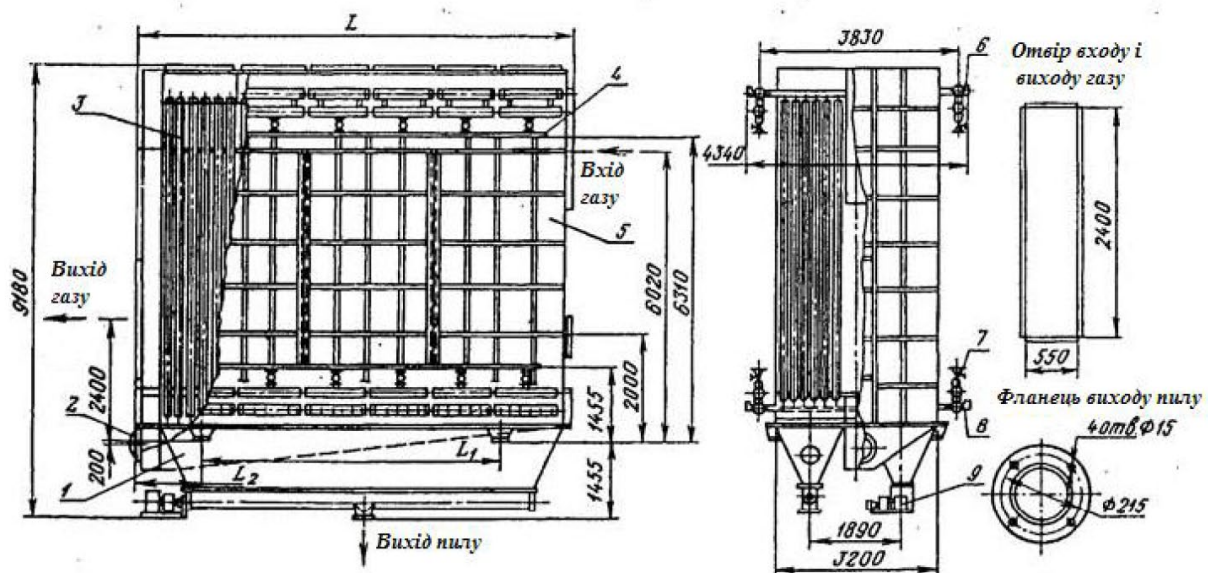


Рисунок 3.4 – Рукавні фільтри типу ФРКДІ: 1 – бункерна частина корпусу; 2 – люк; 3 – рукав; 4 – колектор; 5 – корпус; 6 – секція клапанів; 7 – фланцевий вентилятор; 8 – секція клапанів; 9 – гвинтовий транспортер [1]

Регенерація рукавів відбувається за допомогою імпульсів стиснутого повітря, що подається одночасно зверху та знизу.

Умовне позначення типорозміру електрофільтру: Ф – фільтр; Р – рукавний; К – каркасний; ДІ – з двохсторонньою імпульсною продувкою; цифри – площа фільтруючої поверхні в м<sup>2</sup> [1].

В табл. 3.3 приведена технічна характеристика фільтрів типу ФРКДІ [1].

Таблиця 3.3 – Технічна характеристика фільтрів типу ФРКДІ [1]

Показник	Типорозмір фільтру		
	ФРКДІ-550	ФРКДІ-720	ФРКДІ-1100
Площа фільтруючої поверхні, м <sup>2</sup>	550	720	1100
Кількість рукавів	216	288	432
Діаметр рукавів, мм	135	135	135
Висота рукавів, м	6	6	6
Кількість мембранних клапанів	72	96	144
Питоме газове навантаження, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·хв, не більше	1,6	1,6	1,6
Допустима запиленість газу, г/м <sup>3</sup>	50	50	50
Гідравлічний опір, кПа, не більше	2,8	2,8	2,8
Тиск продувочного повітря, МПа	0,6	0,6	0,6
Найбільша витрата стиснутого повітря, м <sup>3</sup> /год	150	200	300
Допустимий тиск всередині апарату, кПа	5	5	5
Розміри, мм			
L <sub>1</sub>	3000	4500	6000
L <sub>2</sub>	1100	1105	1692
Габаритні розміри, мм:			
довжина	4940	6280	8955
ширина	4340	4340	4340
висота	9180	9180	9180
Маса з рукавами, т, не більше	18,4	22,5	31,3

Поверхню фільтрування апарату або групи апаратів визначаємо за формулою [1]:

$$F_{\Phi} = \frac{V+V_p}{60 \cdot q} + F_p, \text{ м}^2, \quad (3.1)$$

- де  $V$  – витрата газу на очищення, м<sup>3</sup>/год;  
 $V_p$  – витрата газу на регенерацію, м<sup>3</sup>/год;  
 $q$  – питоме газове навантаження при фільтруванні, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·хв);  
 $F_p$  – фільтруюча поверхня, що відключається на регенерацію на протязі 1 год., м<sup>2</sup>

Для фільтрів з імпульсною продувкою, у зв'язку з короткочасністю процесу регенерації, поверхнею фільтру, що відключається на час регенерації, та об'ємом газу, що витрачається на регенерацію, можна знехтувати. Питоме газове навантаження на фільтрувальну перегородку коливається від 0,3 до 6 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·хв), для практичних розрахунків може визначатися за формулою [1]:

$$q = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв}), \quad (3.2)$$

- де  $q_n$  – нормативне питоме навантаження, що залежить від виду пилу та його схильності до агломерації (визначається з табл. 3.4);
- $C_1$  – коефіцієнт, що характеризує особливість регенерації фільтрувальних елементів;
- $C_2$  – коефіцієнт, що враховує вплив концентрації пилу на питоме газове навантаження (визначається за рис. 3.5);
- $C_3$  – коефіцієнт, що враховує вплив дисперсного стану пилу в газі (визначається за табл. 3.5);
- $C_4$  – коефіцієнт, що враховує вплив температури газу (визначається за табл. 3.6);
- $C_5$  – коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення

Таблиця 3.4 – Значення нормативного питомого газового навантаження [1]

Значення $q_n$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв})$				
3,5	2,6	2	1,7	1,2
Комбікорм	Азбест	Глинозем	Кокс	Активоване вугілля
Мука	Волокнисті та целюлозні матеріали	Цемент	Летюча зола	Технічний вуглець
Зерно	Пил при вибиванні відливков з форм	Керамічні барвники	Порошки металів	Миючі речовини
Жомова суміш	Гіпс	Вугілля	Оксиди металів	Порошкове молоко
Пил шкіри	Вапно гашене	Плавиковий шпат	Пластмаси	Возгонки кольорових та чорних металів
Тирса	Пил від полірування	Гума	Барвники	
Тютюн	Сіль	Каолін	Силікати	
Картонний пил	Пісок	Вапно	Крохмаль	
Полівінілхлорид	Тальк	Цукор	Смоли сухі	
	Кальцинована сода	Пил гірських порід	Хімікати з нафтосировини	

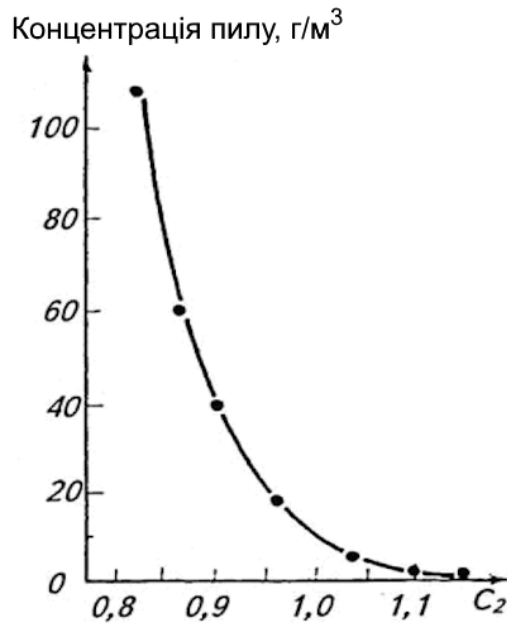


Рисунок 3.5 – Залежність значення коефіцієнту  $C_2$  від концентрації пилу [1]

Таблиця 3.5 – Значення коефіцієнту  $C_3$ , що враховує вплив дисперсного складу пилу [1]

Медіанний розмір часток пилу, мкм	Коефіцієнт $C_3$
більше 100	1,2-1,4
50-100	1,1
10-50	1
3-10	0,9
менше 3	0,7-0,9

Таблиця 3.6 – Значення коефіцієнту  $C_4$ , що враховує вплив температури [1]

t, °C	20	40	60	80	100	120	140	160
$C_4$	1	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,70

Для коефіцієнта, що характеризує особливість регенерації фільтрувальних елементів, в якості базового варіанту приймають фільтр з імпульсною продувкою стиснутим повітрям з тканинними рукавами. Для цього апарату коефіцієнт  $C_1 = 1$ . При використанні рукавів з нетканих матеріалів значення коефіцієнта може збільшуватись на 5-10 % [1].

Коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення, оцінюється по концентрації пилу в вихідному газі. Приймають, що в нормально функціонуючому фільтрі концентрація пилу на виході не повинна перевищувати  $30 \text{ мг/м}^3$ . Для цих умов приймається значення  $C_5 = 1$ . Якщо до якості очищення ставляться більш жорсткі вимоги, то коефіцієнт  $C_5$  знижується. В разі, якщо концентрація пилу в очищених газах не повинна перевищувати  $10 \text{ мг/м}^3$ , коефіцієнт приймається рівним 0,95 [1].

Визначаємо гідравлічний опір рукавного фільтра:

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{\kappa} + \Delta P_{\Pi}, \text{ Па}, \quad (3.3)$$

- де  $\Delta P_{\kappa}$  – опір корпусу апарату, Па;  
 $\Delta P_{\Pi}$  – опір фільтрувальної перегородки, Па

Опір корпусу апарату визначається за формулою [1]:

$$\Delta P_{\kappa} = \frac{\xi \cdot \rho \cdot \omega_{\text{вх}}^2}{2}, \text{ Па}, \quad (3.4)$$

- де  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору корпусу апарату (звичайно складає 1,5-2);  
 $\rho$  – щільність газу, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\omega_{\text{вх}}$  – швидкість газового потоку у вхідному патрубку, м/с

Швидкість газового потоку у вхідному патрубку можна розрахувати за формулою [1]:

$$\omega_{\text{вх}} = \frac{V}{3600 \cdot S_{\text{напр}}}, \text{ м/с}, \quad (3.5)$$

- де  $S_{\text{напр}}$  – площа вхідного патрубка вибраного фільтру, м<sup>2</sup>

Гідравлічний опір фільтрувальної перегородки складається з втрат напору за рахунок самої перегородки  $\Delta P_{\Pi}'$  та за рахунок накопиченого на перегородці пилу  $\Delta P_{\Pi}''$  [1]:

$$\Delta P_{\Pi} = \Delta P_{\Pi}' + \Delta P_{\Pi}'', \text{ Па}. \quad (3.6)$$

Величину  $\Delta P_{\Pi}'$  розраховують по формулі:

$$\Delta P_{\Pi}' = K_{\Pi} \cdot \mu \cdot v^n, \text{ Па}, \quad (3.7)$$

- де  $K_{\Pi}$  – коефіцієнт, що характеризує опір фільтрувальної перегородки, м<sup>-1</sup>;  
 $\mu$  – динамічна в'язкість газу, Па·с;  
 $v$  – швидкість фільтрування, м/с;  
 $n$  – показник ступеня, що залежить від режиму протікання газу через перегородку (для ламінарного режиму  $n = 1$ , для турбулентного –  $n > 1$ )

Рекомендовані швидкості фільтрування можна взяти з табл. 3.7 [1].

Таблиця 3.7 – Рекомендовані орієнтовні швидкості фільтрування газів в рукавних фільтрах з імпульсною продувкою в залежності від виду пилу [1]

Вид пилу	Швидкість фільтрації, м/хв
Сажа, кремнезем, активоване вугілля, цемент	0,8 – 2,0
Возгонки заліза та феросплавів, пил від лиття, глинозем, вапно, корунд, пластмаси	1,5 – 2,5
Тальк, кам'яне вугілля, зола, пил керамічних виробництв, каолін, рудний пил, боксит, вапняк	2,0 – 3,5
Азбест, волокнисті матеріали, перліт, пил від шліфувальних процесів	2,5 – 4,5
Пил від процесів деревообробки, грубі рослинні волокна, шкіряний пил	2,5 – 6,0

Коефіцієнт  $K_n$  визначають експериментально. Наприклад, для фільтрувальних тканин з лавсану, що вловлюють цементний або кварцовий пил з медіанним діаметром в межах 10-20 мкм,  $K_n = (1100-1500) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ; для тих же тканин при вловлюванні возгонки 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 (лавсан, скляна тканина) при вловлюванні возгонки коефіцієнт  $K_n$  зростає в 1,2-1,3 рази. При вловлюванні пилу з медіанним розміром часток менше 1 мкм коефіцієнт  $K_n$  зростає в декілька разів і для лавсану при вловлюванні возгонки кремнію з медіанним діаметром 0,6 мкм складає  $(13000 - 15000) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  [1].

Величину  $\Delta P_n''$  розраховують за формулою:

$$\Delta P_n'' = \mu \cdot t \cdot C_{\text{вх}} \cdot v^2 \cdot K_1, \text{ Па}, \quad (3.8)$$

- де  $t$  – тривалість фільтрувального циклу, с (звичайно приймається 600 с);  
 $C_{\text{вх}}$  – концентрація пилу на вході в фільтр, кг/м<sup>3</sup>;  
 $K_1$  – параметр опору шару пилу, м/кг

Величина  $K_1$  визначається експериментально. Наприклад, для цементу з медіанним діаметром часток 12-20 мкм  $K_1 = (6,5 - 16) \cdot 10^9 \text{ м/кг}$ , для часток кремнію з медіанним діаметром 0,7 мкм  $K_1 = 330 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$ , для возгонки від сталеплавильних дугових печей з медіанним діаметром часток 3,0 мкм  $K_1 = 80 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$  [1].

Варто прийняти до уваги, що загальний опір рукавних фільтрів не повинен перевищувати 2800 Па, а опір шару пилу на перегородці – 600-800 Па [1].

Ступінь очищення газу від пилу в рукавному фільтрі визначається за формулою:

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100 \%, \quad (3.9)$$

### 3.2 Приклад розрахунку рукавного фільтру

#### Задача

Виконайте розрахунок рукавного фільтру [1].

Дано:

витрата газу  $V = 50000 \text{ м}^3/\text{год}$ ;

вид пилу – вапняк;

щільність часток пилу  $\rho_{\text{ч}} = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

медіанний діаметр часток пилу  $d_m = 3,5 \text{ мкм}$ ;

фільтрувальна тканина – лавсан;

температура газу на вході в рукавний фільтр  $t_{\text{ф}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

концентрація пилу на вході в фільтр  $C_{\text{вх}} = 1,5 \text{ г}/\text{м}^3 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

концентрація пилу на виході з фільтру  $C_{\text{вих}} = 15 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;

щільність газу  $\rho = 0,998 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

динамічна в'язкість газу  $\mu = 19 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

#### Рішення

Користуючись табл. 3.4-3.6 та рис. 3.5, з урахуванням вимог до якості очищення визначаємо питоме газове навантаження на фільтрувальну перегородку за формулою (3.2) [1]:

$$q = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 = \\ = 2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 0,78 \cdot 0,95 = 1,47 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв}),$$

- де  $q_n = 2$  – нормативне питоме навантаження, що залежить від виду пилу та його схильності до агломерації (визначається з табл. 3.4);
- $C_1 = 1$  – коефіцієнт, що характеризує особливість регенерації фільтрувальних елементів;
- $C_2 = 1,1$  – коефіцієнт, що враховує вплив концентрації пилу на питоме газове навантаження (визначається за рис. 3.5);
- $C_3 = 0,9$  – коефіцієнт, що враховує вплив дисперсного стану пилу в газі (визначається за табл. 3.5);
- $C_4 = 0,78$  – коефіцієнт, що враховує вплив температури газу (визначається за табл. 3.6);
- $C_5 = 0,95$  – коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення

Знаходимо поверхню фільтрування за формулою (3.1):

$$F_{\phi} = \frac{V+V_p}{60 \cdot q} + F_p = \frac{50000+0}{60 \cdot 1,47} + 0 = 567 \text{ м}^2,$$

- де  $V = 50\,000$  – витрата газу на очищення, м<sup>3</sup>/год;  
 $V_p = 0$  – витрата газу на регенерацію, м<sup>3</sup>/год;  
 $q = 1,47$  – питоме газове навантаження при фільтруванні, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·хв);  
 $F_p = 0$  – фільтруюча поверхня, що відключається на регенерацію на протязі 1 год., м<sup>2</sup>

За табл. 3.3 вибираємо для приведених умов фільтр ФРКДІ-550 з фактичною поверхнею фільтрування 550 м<sup>2</sup> та розмірами вхідного патрубку 2,4 м×0,55 м (див. рис. 3.4). Деяке зменшення поверхні припустиме до тих пір, поки не буде перевищене допустиме питоме газове навантаження для фільтрів даного типу 1,6 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·хв. [1].

Визначаємо швидкість газового потоку у вхідному патрубку за формулою (3.5):

$$\omega_{\text{вх}} = \frac{V}{3600 \cdot S_{\text{напр}}} = \frac{50\,000}{3600 \cdot 2,4 \cdot 0,55} = 10,52 \text{ м/с},$$

- де  $S_{\text{напр}} = 2,4 \text{ м} \times 0,55 \text{ м}$  – площа вхідного патрубка вибраного фільтру, м<sup>2</sup> (див. рис. 3.4)

Задаючись коефіцієнтом гідравлічного опору корпусу  $\xi = 2$ , знаходимо опір корпусу апарата визначаємо за формулою (3.4):

$$\Delta P_{\text{к}} = \frac{\xi \cdot \rho \cdot \omega_{\text{вх}}^2}{2} = \frac{2 \cdot 0,998 \cdot 10,52^2}{2} = 110 \text{ Па},$$

- де  $\xi = 2$  – коефіцієнт гідравлічного опору корпусу апарата (звичайно складає 1,5-2);  
 $\rho = 0,998$  – щільність газу, кг/м<sup>3</sup> (див. вихідні дані)

Для визначення гідравлічного опору фільтрувальної перегородки приймаємо, що  $K_{\text{п}} = 2,3 \cdot 10^9 \cdot 1,2 = 2,76 \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$  (за вихідними даними  $d_m = 3,5 \text{ мкм}$ );  $u = 0,015 \text{ м/с}$  (див. табл. 3.7); для ламінарного режиму  $n = 1$ ;  $K_1 = 80 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$ . Підставляючи ці значення у формули (3.6-3.8), отримуємо:

$$\Delta P_{\text{п}} = \Delta P'_{\text{п}} + \Delta P''_{\text{п}} = K_{\text{п}} \cdot \mu \cdot v^n + \mu \cdot t \cdot C_{\text{вх}} \cdot v^2 \cdot K_1 = 2,76 \cdot 10^9 \cdot 19 \cdot 10^6 \cdot 0,015^1 + 19 \cdot 10^6 \cdot 600 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,015^2 \cdot 80 \cdot 10^9 = 1095 \text{ Па}.$$

Визначаємо гідравлічний опір рукавного фільтра в цілому за формулою (3.3):

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{\kappa} + \Delta P_{\Pi} = 110 + 1095 = 1205 \text{ Па}$$

Ступінь очищення газу від пилу в рукавному фільтрі визначаємо за формулою (3.9):

$$\eta = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100 \% = \frac{1500 - 15}{1500} \cdot 100 = 99 \%$$

### 3.3 Завдання № 1

Виконайте розрахунок рукавного фільтру. Вихідні дані наведені табл. 3.8, а інші вихідні наступні: щільність часток пилу  $\rho_{\text{ч}} = 1800 \text{ кг/м}^3$ ; медіанний діаметр часток пилу  $d_{\text{м}} = 3,5 \text{ мкм}$ ; фільтрувальна тканина – лавсан; температура газу на вході в рукавний фільтр  $t_{\text{ф}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; концентрація пилу на вході в фільтр  $C_{\text{вх}} = 1,5 \text{ г/м}^3 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ ; концентрація пилу на виході з фільтру  $C_{\text{вих}} = 15 \text{ мг/м}^3$ ; щільність газу  $\rho = 0,998 \text{ кг/м}^3$ ; динамічна в'язкість газу  $\mu = 19 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Приклад рішення завдання наведено в п.п. 3.2.

Таблиця 3.8 – Вихідні дані до задачі № 1 за варіантами

№ варіанту	Витрата газу V, тис. м <sup>3</sup> /год	Вид пилу	Температура газу на вході в рукавний фільтр t <sub>ф</sub> , °C
0 (приклад)	50	вапняк	80
1	51	пісок	65
2	52	цемент	70
3	53	вугілля	75
4	54	плавиковий шпат	85
5	55	пил гірських порід	60
6	56	каолін	65
7	57	вапно	85
8	58	кокс	110
9	59	пластмаси	60
10	60	глинозем	65
11	61	каолін	70
12	62	тирса	75
13	63	полівінілхлорид	85
14	55	миючі речовини	60
15	56	пісок	65
16	57	цемент	65
17	58	вугілля	70
18	59	плавиковий шпат	75
19	60	пил гірських порід	85
20	61	каолін	60
21	62	вапно	65
22	63	кокс	65
23	55	пластмаси	70
24	56	летюча зола	150
25	57	возгонки кольорових та чорних металів	120

## Питання для самоперевірки

1. Який принцип дії та конструктивні особливості рукавних фільтрів?
2. Як відбувається імпульсна регенерація?
3. Який розрахунковий алгоритм для визначення ступеню очищення газу від пилу в рукавному фільтрі?

## Перелік рекомендованих джерел

1. Технологія та обладнання захисту атмосфери : Методичні вказівки до виконання курсових проектів / укладач О. І. Іваненко. Київ : ТОВ „Інфодрук”, 2012. 107 с.

2. Технології захисту навколишнього середовища (захист атмосфери) : підручник / В. Г. Петрук та ін. Херсон : Олді-плюс, 2019. 432 с.

## Зміст та вимоги до контрольних точок

Назва контрольної точки	Опис контрольної точки, порядок її проходження та отримання балів
Робота на практичних заняттях	<p>Практичні роботи виконуються безпосередньо на занятті, що є бажаним, однак не обов'язковим; матеріали для виконання практичної роботи доступні в записі, які зберігаються в Microsoft Teams, та викладені в повному обсязі в Moodle. Оцінка за практичну роботу виставляється за фактом виконання та враховуючи правильність розрахунків. Якщо студент виконав роботу з помилками, то за згодою з викладачем може допрацювати свої розрахунки та підвищити оцінки, але не пізніше залікового тижня.</p> <p>Оцінка за захист роботи на практичному (семінарському) занятті виставляється в Moodle наприкінці заняття або продовж доби, після заняття, та може бути оскаржена одразу ж або продовж доби, після виставлення оцінки в Moodle.</p> <p><u>Мах 6 балів:</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– студент дав пряму і релевантну відповідь на поставлене питання з використанням обґрунтованого посилання на теоретичний матеріал та варіації зміни відповідь на зміну вхідних умов, в т.ч. у вигляді додаткових запитань / зміг стисло формалізувати вербально сутність проблеми за ситуацією, ідентифікувати ключові складові і пріоритети вирішення, запропонував логічне розв'язання та виконав вірно завдання і проявив організованість при оформленні розрахункової частини, а за потреби розрахунково-графічної частини (5 балів);</li><li>– оцінка ініціативності у роботі над проблемою, логічності та структурованості відповіді, здатності комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, в т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним і самокритичним (1 бали).</li></ul>

## Практична робота № 4

### Розрахунок скрубера Вентурі

#### 4.1 Швидкісні газопромивачі

Швидкісні газопромивачі – найбільш ефективні апарати мокрого очищення газу, їх застосовують переважно для очищення газу від мікронного і субмікронного пилу (десяті частки мкм) [1].

До швидкісних газопромивачів відносяться скрубери Вентурі, діафрагмові (дросельні) та з рухомим дисковим шибером. Всі вище перераховані апарати характеризуються високим ступенем очищення, великими гідравлічними витратами і необхідністю влаштування краплиного вловлювача (частіше всього циклонного типу) [2]. Найбільш розповсюдженим апаратом цього класу є скрубер Вентурі, найефективніший з мокрих пиловловлювачів, які застосовуються в промисловості [2].

В швидкісних газопромивачах основним фактором, що забезпечує очищення газу, є подача води на очищення у високошвидкісний потік запиленого газу. Це сприяє ретельному диспергуванню води і подальшому промиванню газу водою в турбулентному режимі руху газу. Високі швидкості очищуваного газу забезпечують труби Вентурі. У зв'язку з цим швидкісні газопромивачі також називають скруберами Вентурі [1].

Основна частина скрубера Вентурі, з метою зниження шкідливих гідравлічних втрат, виконується у вигляді труби Вентурі, яка має плавне звуження на вході газів (конфузор) і плавне розширення на його виході (дифузор). Вузька частина труби Вентурі називається горловиною [2].

В цілому скрубери Вентурі представляють собою поєднання труб Вентурі і наступних за трубами краплеуловлювачів. Вода надходить в найбільш швидкісну частину труб Вентурі (в конфузор або горловину) [1].

Елементи скрубера можуть бути змонтовані роздільно (див. рис. 4.1) або в одному корпусі (див. рис. 4.2) [1].

Таким чином, принцип дії скрубера Вентурі полягає в інтенсивному дробленні рідини, що подається на очищення газу у високошвидкісний газовий потік ( $60 \div 150$  м/с) [2], в коагуляції пилу рідиною в турбулентному режимі руху газу і наступному уловлюванні крапель рідини, що утворюють з пилом шлам.

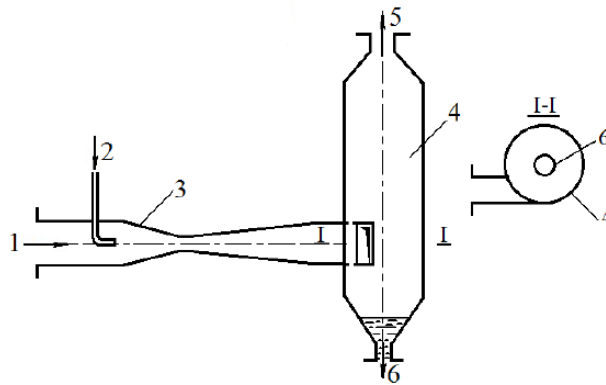


Рисунок 4.1 – Скрубер Вентурі з виносним краплеуловлювачем [1]: 1 – вхід запиленого газу; 2 – підвід зрошувальної рідини; 3 – труба Вентурі; 4 – циклон-краплеуловлювач; 5 – відвід очищеного газу; 6 – відвід шламу

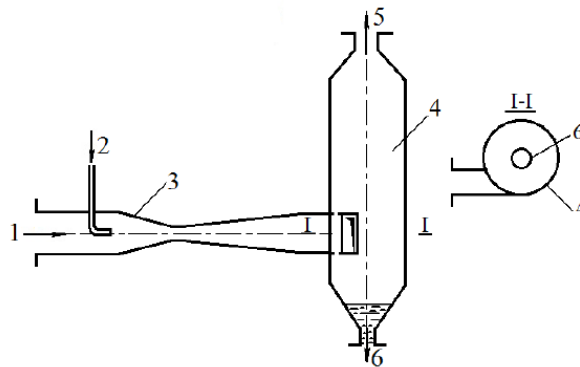


Рисунок 4.2 – Скрубер Вентурі з вбудованим краплеуловлювачем [1]: 1 – підвід запиленого газу; 2 – підвід зрошувальної рідини; 3 – труба Вентурі; 4 – корпус краплеуловлювача; 5 – відцентровий завихрювач; 6 – патрубок для концентрації шламу; 7 – відвід шламу; 8 – вихід очищеного газу

Плавне звуження конфузора (оптимальне  $25\div 28^\circ$ ), а потім плавне розширення дифузора (оптимальне  $6\div 7^\circ$ ) роблять трубу Вентурі з аеродинамічної точки зору найбільш кращою для розпилювання зрошувальної води (рис. 4.3) [1].

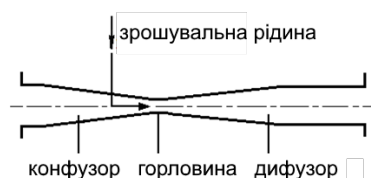


Рисунок 4.3 – Труба Вентурі [1]

У конфузори газ розвиває велику швидкість, що сприяє дробленню води на найдрібніші краплі. В дифузори внаслідок зниження швидкості

відбувається укрупнення крапель води з пилом, що полегшує їх відділення у краплеуловлювачі.

В якості краплеуловлювача зазвичай використовують найпростіші апарати інерційного типу або циклони.

Найвні різні конструкції скрубєрів Вентурів, відмінні за способом підведення зрошувальної води.

## 4.2 Методика розрахунку

У розрахунку скрубєрів Вентурі надають перевагу енергетичному методу, за яким ефективність роботи мокрих пиловловлювачів визначається витратами енергії на процес очищення газу. Затрати енергії складаються з гідравлічного опору апарату  $\Delta p_{an}$  та тиску розпилуваної рідини на вході в апарат  $\Delta p_{ж}$  [1]:

$$K = \Delta p_{an} + m \cdot p_{ж}, \quad (4.1)$$

де  $m$  – питома витрата зрошувальної рідини, кг/м<sup>3</sup> газу

Ступінь уловлювання пилу залежно від витрат енергії на очищення визначається за формулою:

$$\eta = 1 - \exp(-B_1 \cdot K^x), \quad (4.2)$$

де  $B_1$  та  $x$  – константи, що залежать від властивостей уловлюваного пилу (див. табл. 4.1)

Таблиця 4.1 – Значення констант  $B_1$  і  $x$  для деяких видів пилу металургійного виробництва [1]

Пил відхідних газів	$B_1$	$x$
доменних печей	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
мартенівських печей	$1,57 \cdot 10^{-6}$	1,619
сталеплавильних конверторів	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,466
електросталеплавильних печей	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,260
вапняно-випалювальних печей	$6,50 \cdot 10^{-4}$	0,053

Основні положення розрахунку скрубєра Вентурі [1]:

1. За заданими початковою  $z_1$  і кінцевою  $z_2$  запиленістю газу обчислюється необхідний ступінь уловлювання пилу:

$$\eta = \frac{z_1 - z_2}{z_1}. \quad (4.3)$$

2. Відповідно до значення  $\eta$  і прийнятих значень  $B_1$  і  $x$  (див. табл. 4.1) з виразу (4.2) обчислюється значення  $K$  [1]:

$$K = \sqrt[x]{-\frac{1}{B_1} \cdot \ln(1 - \eta)}. \quad (4.4)$$

3. Приймається питома витрата зрошувальної рідини  $m$  і відповідно до виразу (4.1) визначається гідравлічний опір скрубера Вентурі:

$$\Delta p_{an} = K - m \cdot p_{ж}. \quad (4.5)$$

4. Визначається гідравлічний опір краплевловлювача  $\Delta p_k$  (зазвичай за дослідними даними) і обчислюється гідравлічний опір труби Вентурі:

$$\Delta p_{тр} = \Delta p_{an} - \Delta p_k. \quad (4.6)$$

5. Приймають позначення конструктивних характеристик труби Вентурі (див. рис. 4.4) [1].

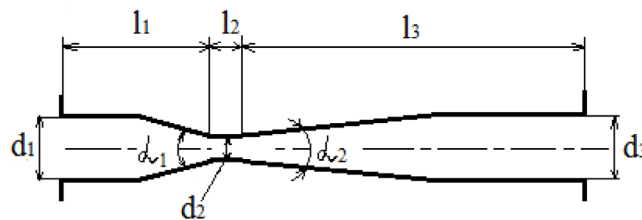


Рисунок 4.4 – Прийняті позначення конструктивних характеристик труби Вентурі [1]:

$d_1, l_1, \alpha_1$  – діаметр вхідного перерізу, довжина і кут звуження конфузора;

$d_2, l_2$  – еквівалентний діаметр і довжина горловини;

$d_3, l_3, \alpha_2$  – діаметр вихідного перерізу, довжина і кут розкриття дифузора

6. Визначаються або приймаються значення коефіцієнта гідравлічного опору сухої (без подачі зрошувальної рідини) труби Вентурі  $\xi_1$  і коефіцієнта, що враховує додаткові втрати тиску, спричинені подачею в трубу зрошувальної рідини  $\xi_2$  [1].

За оптимальної з аеродинамічної точки зору довжини горловини труби-розпилювача  $l_2 = 0,15 \cdot d_2$  коефіцієнт опору  $\xi_1$  приймається в межах  $0,12 \div 0,15$ . Зазначені значення  $\xi_1$  можуть бути поширені як на круглі труби так і на труби з прямокутним перерізом горловини.

Коефіцієнт опору труби Вентурі, зумовлений уведенням зрошувальної рідини, визначається виразом:

$$\xi_2 = A \cdot \xi_1 \cdot m^{B_2}, \quad (4.7)$$

де  $A$  та  $B_2$  – емпіричні коефіцієнти, значення яких наведено в табл. 4.2 [1]

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнтів  $A$  і  $B_2$  [1]

Спосіб зрошення труби Вентурі	Швидкість газу в горловині, м/с	Довжина горловини $l_2$ , м	Коефіцієнти	
			$A$	$B_2$
центральне зрошення перед конфузореом і плівкове зрошення	>80	$(0,15-12,0)d_2$	$1,68(l_2/d_2)^{0,290}$	$1-1,12(l_2/d_2)^{-0,045}$
	<80	$0,15d_2$	$3,49(l_2/d_2)^{0,266}$	$1-0,98(l_2/d_2)^{0,020}$
центральне зрошення в конфузоре	$40\div 150$	$0,15d_2$	0,63	-0,3
периферійне зрошення в конфузоре	>80	$0,15d_2$	13,4	0,024
	<80	$0,15d_2$	1,4	-0,316

7. Обчислюється швидкість газу в горловині труби Вентурі, м/с

$$u_{\Gamma} = \left( \frac{2 \cdot \Delta p_{\text{TP}}}{(\xi_1 \cdot \rho_{\Gamma}) + (\xi_2 \cdot m \cdot \rho_{\text{ж}})} \right)^{0,5}, \quad (4.8)$$

де  $\rho_{\Gamma}$  та  $\rho_{\text{ж}}$  – відповідно, густина газу, що очищується, і зрошувальної рідини, кг/м<sup>3</sup>

8. Визначається діаметр горловини труби Вентурі, м [1]:

$$d_2 = 1,13 \cdot \left( \frac{V}{u_{\Gamma}} \right)^{0,5}, \quad (4.9)$$

де  $V$  – витрата очищуваного газу за робочих умов, м<sup>3</sup>/с;  
1,13 – коефіцієнт, що замінює  $\sqrt{4/\pi}$

9. Приймаються оптимальними наступні конструктивні співвідношення труби Вентурі [1]:

- кут звуження конфузоре  $\alpha_1 = 25\div 28^\circ$ ;
- довжина конфузоре  $l_1 = \frac{[(d_1 - d_2)/2]}{\text{tg}(\alpha_1/2)}$ ;
- довжина горловини труби  $l_2 = 0,15 \cdot d_2$ ;
- кут розкриття дифузоре  $\alpha_2 = 6\div 7^\circ$ ;
- довжина дифузоре  $l_3 = \frac{[(d_3 - d_2)/2]}{\text{tg}(\alpha_2/2)}$ .

### 4.3 Приклад розрахунку

Задача (приклад)

Розрахувати скруббер Вентурі для очищення відхідних газів мартенівської печі: визначити розміри скрубера, ефективність і гідравлічний опір [1].

Вихідні дані:

- витрата вологих газів за нормальних умов –  $V_0=150\ 000\ \text{м}^3/\text{год}$ ;
- температура газів на вході в скруббер –  $t_1=200^\circ\text{C}$ ;
- розрідження газу перед скруббером –  $p_r=5\ \text{кПа}$ ;
- густина газу за нормальних умов –  $\rho_0=1,29\ \text{кг}/\text{м}^3$ ;
- концентрація пилу в газі на вході в скруббер –  $z_1=5\ \text{г}/\text{м}^3$ ;
- напір води, що надходить на зрошення, –  $p_{\text{ж}}=300\ \text{кПа}$ ;
- необхідна концентрація пилу в газі на виході зі скрубера –  $z_2=100\ \text{мг}/\text{м}^3$ .

Рішення

За формулою (4.3) визначається необхідний ступінь очищення газу [1]:

$$\eta = \frac{z_1 - z_2}{z_1} = \frac{5 - 0,1}{5} = 0,98.$$

За формулою (4.4) з урахуванням коефіцієнтів  $B_1$  і  $x$ , прийнятих за табл. 4.1 [1], обчислюються витрати енергії на очищення газу:

$$K = x \sqrt{-\frac{1}{B_1} \cdot \ln(1 - \eta)} = {}^{1,619} \sqrt{-\frac{1}{1,57 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln(1 - 0,98)} = 8928\ \text{кДж}/1000\text{м}^3\ \text{газу}$$

Загальний гідравлічний опір скрубера Вентурі визначається за формулою (4.5), в якій питома витрата зрошувальної рідини  $m$  прийнята  $0,001\ \text{м}^3/\text{м}^3$  газу [1]:

$$\Delta p_{\text{ан}} = K - m \cdot p_{\text{ж}} = 8928 - 0,001 \cdot 300\ 000 = 8628\ \text{Па}.$$

Густина газу з урахуванням дійсних умов становитиме [1]:

$$\rho_{\text{д}} = \rho_0 \frac{273 \cdot (101,3 - p_r)}{(273 + t_1) \cdot 101,3} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 - 5)}{(273 + 200) \cdot 101,3} = 0,71\ \text{кг}/\text{м}^3,$$

де  $101,3$  – тиск газу за нормальних умов, кПа

Об'ємна витрата газу, що надходить на очищення, за дійсних умов:

$$V_d = V_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_d} = 150\,000 \cdot \frac{1,29}{0,71} = 273\,000 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Витрата зрошувальної рідини (води):

$$M = m \cdot V_d = 0,001 \cdot 273\,000 = 273 \text{ кг/год.}$$

Гідравлічний опір циклона-краплевловлювача  $\Delta p_k$  на основі досвіду роботи аналогічних установок приймається 100 Па.

Гідравлічний опір труби Вентурі визначаємо за формулою (4.6):

$$\Delta p_{\text{тр}} = \Delta p_{\text{ан}} - \Delta p_k = 8628 - 100 = 8528 \text{ Па} \approx 8,5 \text{ кПа.}$$

Температура насиченого вологою газу на виході зі скрубера Вентурі визначається за формулою (4.10):

$$t_2 = (0,113 - 41 \cdot m) \cdot t_1 + 35,$$

$$t_2 = (0,113 - 41 \cdot 0,001) \cdot 200 + 35 = 53,4 \text{ }^\circ\text{C} \approx 53 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Густина газу на виході з труби Вентурі [1]:

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot [101,3 - (\rho_r + \Delta p_{\text{тр}})]}{(273 + t_2) \cdot 101,3} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot [101,3 - (5 + 8,5)]}{(273 + 53) \cdot 101,3} = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

Вибирається труба Вентурі з центральним підведенням зрошувальної рідини в конфузور. При цьому значення коефіцієнта гідравлічного опору  $\xi_1$  сухої труби без зрошення приймається середньою в інтервалі  $0,12 \div 0,15$ , тобто  $\xi_1 = 0,125$ .

Гідравлічний опір зрошувальної труби визначається за формулою (4.7) з урахуванням відповідних значень А і  $B_2$  (див. табл. 4.2):

$$\xi_2 = A \cdot \xi_1 \cdot m^{B_2} = 0,63 \cdot 0,125 \cdot 0,001^{-0,3} = 0,62.$$

Швидкість газу в горловині труби Вентурі обчислюється за формулою (4.8):

$$u_r = \left( \frac{2 \cdot \Delta p_{\text{тр}}}{(\xi_1 \cdot \rho_r) + (\xi_2 \cdot m \cdot \rho_{\text{ж}})} \right)^{0,5} = \left( \frac{2 \cdot 8528}{(0,125 \cdot 0,93) + (0,62 \cdot 0,001 \cdot 1000)} \right)^{0,5} = 152 \text{ м/с.}$$

Об'ємна витрата газу на виході з труби Вентурі складе:

$$V_2 = V_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_2} = \frac{150\,000}{3600} \cdot \frac{1,29}{0,93} = 57,8 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Діаметр горловини труби Вентурі складе за формулою (4.9):

$$d_2 = 1,13 \cdot \left(\frac{V_2}{u_r}\right)^{0,5} = 1,13 \cdot \left(\frac{57,8}{152}\right)^{0,5} = 0,69 \text{ м.}$$

Одержане значення діаметра горловини значно перевищує найбільший діаметр горловини типорозмірного ряду високонапірних труб Вентурі: 115, 135, 155, 180, 200, 240, 280, 320, 370, 420.

У зв'язку з цим потрібно встановити кілька паралельно працюючих труб Вентурі. Приймається кількість труб  $n = 4$ . В цьому разі діаметр горловини кожної з чотирьох ідентичних труб складе:

$$d_2 = 1,13 \cdot \left(\frac{V}{n \cdot u_r}\right)^{0,5} = 1,13 \cdot \left(\frac{57,8}{4 \cdot 152}\right)^{0,5} = 0,35 \text{ м.}$$

У відповідності з типорозмірним рядом приймається діаметр горловини труби Вентурі 370 мм.

При цьому довжина горловини складе:  $l_2 = 0,15 \cdot d_2 = 0,15 \cdot 0,35 = 0,05 \text{ м.}$

Швидкість газу в горловині труби в цьому разі складе:

$$u_r = \frac{1,13^2 \cdot V_2}{d_2^2 \cdot n} = \frac{1,13^2 \cdot 57,8}{0,35^2 \cdot 4} = 150,6 \text{ м/с.}$$

Береться швидкість газу на вході в конфузори і на виході з дифузора труби Вентурі рівною 20 м/с. При цій швидкості діаметр вхідного перерізу конфузора складе:

$$d_1 = 1,13 \cdot \left(\frac{V_d}{n \cdot u_r}\right)^{0,5} = 1,13 \cdot \left(\frac{273\,000}{3600 \cdot 4 \cdot 20}\right)^{0,5} = 1,1 \text{ м,}$$

а діаметр вихідного перерізу дифузора складе:

$$d_3 = 1,13 \cdot \left(\frac{V_2}{n \cdot u_r}\right)^{0,5} = 1,13 \cdot \left(\frac{57,8}{4 \cdot 20}\right)^{0,5} = 0,96 \text{ м.}$$

Кут звуження конфузора приймається  $\alpha_1 = 25^\circ$ . Довжина конфузора складе:

$$l_1 = \frac{[(d_1 - d_2)/2]}{\text{tg}(\alpha_1/2)} = \frac{[(1,1 - 0,35)/2]}{\text{tg}(25/2)} = 1,7 \text{ м.}$$

Кут розкриття дифузора приймається  $\alpha_2 = 6^\circ$ . Довжина дифузора складе:

$$l_3 = \frac{[(d_3 - d_2)/2]}{\operatorname{tg}(\alpha_2/2)} = \frac{[(0,96 - 0,35)/2]}{\operatorname{tg}(6/2)} = 5,8 \text{ м.}$$

Результати розрахунків зводимо у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку скрубера Вентурі

Найменування показників	Позначення	Величина
Розміри скрубера:		
– діаметр вхідного перетину конфузора, м	$d_1$	1,1
– довжина конфузора, м	$l_1$	1,7
– кут звуження конфузора, град.	$\alpha_1$	25
– діаметр горловини, м	$d_2$	0,35
– довжина горловини, м	$l_2$	0,05
– кут розкриття дифузора, град.	$\alpha_2$	6
– довжина дифузора, м	$l_3$	5,8
– діаметр вихідного перерізу дифузора, м	$d_3$	0,96
Ефективність (ступінь) уловлювання пилу	$\eta$	0,98
Гідравлічний опір:		
– труби Вентурі, Па	$\Delta p_{\text{тр}}$	8528
– циклона-краплеуловлювача, Па	$\Delta p_{\text{к}}$	100
– скрубера Вентурі в цілому, Па	$\Delta p_{\text{ан}}$	8628

#### 4.4 Задача за варіантами

##### Задача

Розрахувати скрубера Вентурі для очищення відхідних газів печі: визначити розміри скрубера, ефективність і гідравлічний опір. Вихідні дані наведені у табл. 4.4 за варіантами. Вихідні дані, які є спільними для всіх варіантів, наступні:

- витрата вологих газів за нормальних умов –  $V_0 = 150\,000 \text{ м}^3/\text{год}$ ;
- температура газів на вході в скрубера –  $t_1 = 200^\circ\text{C}$ ;
- розрідження газу перед скруберам –  $p_r = 5 \text{ кПа}$ ;
- густина газу за нормальних умов –  $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ;
- концентрація пилу в газі на вході в скрубера –  $z_1 = 5 \text{ г/м}^3$ ;
- напір води, що надходить на зрошення, –  $p_{\text{ж}} = 300 \text{ кПа}$ ;
- необхідна концентрація пилу в газі на виході зі скрубера –  $z_2 = 100 \text{ мг/м}^3$ .

Приклад розрахунку наведено в п. 4.2-4.3.

Таблиця 4.4 – Вихідні дані за варіантами

№ варіанту	Пил відхідних газів	Температура газів на вході в скрубера $t_1, ^\circ\text{C}$
0 (приклад)	мартенівських печей	200
1	доменних печей	198
2	сталеплавильних конверторів	195
3	електросталеплавильних печей	194

№ варіанту	Пил відхідних газів	Температура газів на вході в скруббер $t_1$ , °C
4	вапняно-випалювальних печей	192
5	доменних печей	190
6	сталеплавильних конверторів	188
7	електросталеплавильних печей	186
8	вапняно-випалювальних печей	184
9	доменних печей	182
10	сталеплавильних конверторів	180
11	електросталеплавильних печей	178
12	вапняно-випалювальних печей	176
13	доменних печей	175
14	сталеплавильних конверторів	174
15	електросталеплавильних печей	172
16	вапняно-випалювальних печей	170
17	доменних печей	168
18	сталеплавильних конверторів	165
19	електросталеплавильних печей	162
20	вапняно-випалювальних печей	160

### Питання для самоперевірки

1. З чого складаються затрати енергії на процес очищення газу в мокрих пиловловлювачах скруберах Вентурі?
2. Від чого залежать константи  $B_1$  та  $x$ , які використовуються для визначення ступіню уловлювання пилу у скрубери Вентурі (за енергетичним методом)?
3. Який алгоритм основних дій під час розрахунку скрубера Вентурі за енергетичним методом?

### Перелік рекомендованих джерел

1. Гічов Ю.О. Очищення газів. Частина I : Конспект лекцій. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2015. 51 с.
2. Петрук В. Г., Васильківський І. В., Петрук Р. В., Крусір Г. В., Клименко М. О., Сакалова Г. В. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 1. Захист атмосфери : ел. підручник. Херсон : Олді-плюс, 2010. URL: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/iebmp/severin\\_priodoohoronni\\_tehnologii/5-8.html](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/iebmp/severin_priodoohoronni_tehnologii/5-8.html) (дата звернення: 01.02.2024).

## Зміст та вимоги до контрольних точок

Назва контрольної точки	Опис контрольної точки, порядок її проходження та отримання балів
Робота на практичних заняттях	<p>Практичні роботи виконуються безпосередньо на занятті, що є бажаним, однак не обов'язковим; матеріали для виконання практичної роботи доступні в записі, які зберігаються в Microsoft Teams, та викладені в повному обсязі в Moodle. Оцінка за практичну роботу виставляється за фактом виконання та враховуючи правильність розрахунків. Якщо студент виконав роботу з помилками, то за згодою з викладачем може допрацювати свої розрахунки та підвищити оцінки, але не пізніше залікового тижня.</p> <p>Оцінка за захист роботи на практичному (семінарському) занятті виставляється в Moodle наприкінці заняття або продовж доби, після заняття, та може бути оскаржена одразу ж або продовж доби, після виставлення оцінки в Moodle.</p> <p><u>Мах 6 балів:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– студент дав пряму і релевантну відповідь на поставлене питання з використанням обґрунтованого посилання на теоретичний матеріал та варіації зміни відповідь на зміну вхідних умов, в т.ч. у вигляді додаткових запитань / зміг стисло формалізувати вербально сутність проблеми за ситуацією, ідентифікувати ключові складові і пріоритети вирішення, запропонував логічне розв'язання та виконав вірно завдання і проявив організованість при оформленні розрахункової частини, а за потреби розрахунково-графічної частини (5 балів);</li> <li>– оцінка ініціативності у роботі над проблемою, логічності та структурованості відповіді, здатності комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, в т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним і самокритичним (1 бали).</li> </ul>

Практична робота № 5  
Розрахунок сухого пластинчастого електрофільтра

**5.1 Методика розрахунку електрофільтра**

При проектуванні електрофільтрів очікувану ступінь очищення газів розраховують по напівемпіричним формулам. Після вибору типу електрофільтра (наприклад ЕГА – електрофільтр, горизонтальний, модифікації А), що задовольняє вимогам проекту, на підставі наявних вихідних даних обчислюють величини, які наведені нижче [1].

Відносна щільність очищуваного газу:

$$\beta = \frac{p \cdot (273 + t_{ст})}{p_{ст} \cdot (273 + t)}, \quad (5.1)$$

де  $p$  та  $t$  – тиск і температура очищуваного газу, кПа і °С;  
 $p_{ст}$  і  $t_{ст}$  – тиск і температура газу за стандартних умов, кПа і °С

Критична напруженість електричного поля:

$$E_{кр} = 3,04 \cdot \left( \beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \text{ В/м}, \quad (5.2)$$

де  $R_1$  – радіус вістря коронуючого електрода ( $R_1 = 1$  мм).

Критична напруга корони:

$$U_{кр} = E_{кр} \cdot R_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right), \text{ В}, \quad (5.3)$$

де  $H$  – відстань між площинами коронуючих та осаджувальних електродів, м;

$S_1$  – крок коронуючих електродів, м

Для електрофільтрів типу ЕГА:

$$H = \frac{0,300}{2}, \text{ м} \quad S_1 = 0,18 \text{ м}$$

Напруженість електричного поля:

$$E = \left[ \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot H \cdot U \cdot (U - U_{кр})}{9 \cdot 10^9 \cdot \epsilon_0 \cdot S_1^3 \cdot \left( \frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right)} \right]^{0,5}, \text{ В/м}, \quad (5.4)$$

- де  $f$  – коефіцієнт, що залежить від відношення  $H/S_1$  (при  $H/S_1=0,300/(2\cdot 0,18)=0,833$  значення  $f=0,0423$ );  
 $U$  – середнє значення робочої напруги (60... 100 кВ), В;  
 $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму ( $8,85\cdot 10^{-12}$  Ф/м)

Швидкість дрейфу частинок пилу в електричному полі:

$$w = \frac{0,118\cdot 10^{-10}\cdot E^2\cdot r}{\mu}, \text{ м/с}, \quad (5.5)$$

- де  $r$  – еквівалентний радіус частинки пилу, м;  
 $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості очищеного газу за робочих умов, Па·с

Фракційна ступінь уловлювання пилу:

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{w\cdot T}{2\cdot u}\right), \quad (5.6)$$

- де  $T$  – відношення загальної площі осадження до площі активного перерізу електрофільтра (табл. 5.1) [1];  
 $u$  – швидкість газу в електрофільтрі, м/с

Таблиця 5.1 – Конструктивні характеристики електрофільтрів ЕГА [1]

Типорозмір електрофільтра*	Активна висота електродів, м	Число полів	Площа активного перерізу $S$ , м <sup>2</sup>	Загальна площа осаджування $S_0$ , м <sup>2</sup>	Габаритні розміри електрофільтра, м			$T = \frac{S_0}{S}$
					довжина	ширина (по осях опор)	висота	
ЕГА 1-10-6-4-2	6,0	2	16,5	630	9,26	3,2	12,4	38,2
ЕГА 1-10-6-4-3	6,0	3	16,5	950	13,44	3,2	12,4	57,6
ЕГА 1-10-6-6-2	6,0	2	16,5	950	11,82	3,2	12,4	57,6
ЕГА 1-10-6-6-3	6,0	3	16,5	1430	17,28	3,2	12,4	86,7
ЕГА 1-14-7,5-4-3	7,5	3	28,7	1660	13,44	4,4	13,9	57,8
ЕГА 1-14-7,5-4-4	7,5	4	28,7	2210	17,62	4,4	13,9	77,0
ЕГА 1-14-7,5-6-2	7,5	2	28,7	1660	11,82	4,4	14,9	57,8
ЕГА 1-14-7,5-6-3	7,5	3	28,7	2480	17,28	4,4	14,9	86,4
ЕГА 1-20-7,5-4-3	7,5	3	41,0	2360	13,44	6,2	15,4	57,6
ЕГА 1-20-7,5-4-4	7,5	4	41,0	3160	17,62	6,2	15,4	77,0
ЕГА 1-20-7,5-6-2	7,5	2	41,0	2360	11,82	6,2	15,4	57,6
ЕГА 1-20-7,5-6-3	7,5	3	41,0	3550	17,28	6,2	15,4	86,6
ЕГА 1-20-9-6-2	9,0	2	49,0	2830	11,82	6,2	16,9	57,7
ЕГА 1-20-9-6-3	9,0	3	49,0	4240	17,28	6,2	16,9	86,5
ЕГА 1-20-9-6-4	9,0	4	49,0	5660	22,74	6,2	16,9	115,5
ЕГА 1-30-7,5-4-3	7,5	3	61,4	3550	13,44	9,2	14,9	57,8
ЕГА 1-30-7,5-4-4	7,5	4	61,4	4730	17,62	9,2	14,9	77,0
ЕГА 1-30-7,5-6-2	7,5	2	61,4	3550	11,82	9,2	14,9	57,8
ЕГА 1-30-7,5-6-3	7,5	3	61,4	5320	17,28	9,2	14,9	86,7
ЕГА 1-30-9-6-2	9,0	2	73,4	4240	11,82	9,2	16,4	57,8
ЕГА 1-30-9-6-3	9,0	3	73,4	6460	17,28	9,2	16,4	88,0
ЕГА 1-30-9-6-4	9,0	4	73,4	8480	22,74	9,2	16,4	115,5
ЕГА 1-30-12-6-3	12,0	3	97,4	8430	17,28	9,2	19,4	86,5
ЕГА 1-30-12-6-4	12,0	4	97,4	11240	22,74	9,2	19,4	115,4
ЕГА 1-40-7,5-4-3	7,5	3	81,9	4730	13,44	12,2	15,4	57,7
ЕГА 1-49-7,5-4-4	7,5	4	81,9	6310	17,62	12,2	15,4	77,0

Типорозмір електрофільтра*	Активна висота електродів, м	Число полів	Площа активного перерізу S, м <sup>2</sup>	Загальна площа осаджування S <sub>0</sub> , м <sup>2</sup>	Габаритні розміри електрофільтра, м			T = $\frac{S_0}{S}$
					довжина	ширина (по осях опор)	висота	
ЕГА 1-40-7,5-6-2	7,5	2	81,9	4730	11,82	12,2	15,4	57,5
ЕГА 1-40-7,5-6-3	7,5	3	81,9	7100	17,28	12,2	15,4	86,7
ЕГА 1-40-9-6-2	9,0	2	97,9	5650	11,82	12,2	16,9	57,7
ЕГА 1-40-9-6-3	9,0	3	97,9	8480	17,28	12,2	16,9	86,6
ЕГА 1-40-9-6-4	9,0	4	97,9	11300	22,74	12,2	16,9	115,4
ЕГА 1-40-12-6-2	12,0	3	129,8	11240	17,28	12,2	19,9	86,5
ЕГА 1-40-12-6-3	12,0	4	129,8	15000	22,74	12,2	19,9	115,6
ЕГА 2-48-12-6-3	12,0	3	155,8	13500	17,28	15,2	19,9	86,6
ЕГА 2-48-12-6-4	12,0	4	155,8	18000	22,74	15,2	19,9	115,3
ЕГА 2-56-12-6-3	12,0	3	181,7	15750	17,28	17,6	19,9	86,7
ЕГА 2-56-12-6-4	12,0	4	181,7	21000	22,74	17,6	19,9	115,6
ЕГА 2-76-12-6-3	12,0	3	246,6	21400	17,28	23,6	19,9	86,8
ЕГА 2-76-12-6-4	12,0	4	246,6	28500	22,74	23,6	19,9	115,6
ЕГА 2-88-12-6-3	12,0	3	285,6	24750	17,28	27,2	19,9	86,7
ЕГА 2-88-12-6-4	12,0	4	285,6	33000	22,74	27,2	19,9	115,5

Примітка. «\*» Умовні позначення типорозміру електрофільтра: Е – електрофільтр; Г – горизонтальний; А – модифікація; числа після букв позначають: перше – кількість секцій, друге – кількість газових проходів, третє – номінальна висота електродів (м), четверте – кількість елементів в осаджувальному електроді, п'яте – кількість електричних полів по довжині електрофільтра.

Загальна ступінь уловлювання пилу:

$$\eta = \sum_1^n \eta_i \cdot \phi_i, \% \quad (5.7)$$

де  $\phi_i$  – вміст  $i$ -ї фракції в уловлюваному пилу, %

Необхідна ефективність очищення газу від пилу:

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} \cdot 100, \% \quad (5.8)$$

де  $z_1$  і  $z_2$  – задані початкова і кінцева запиленість газу, г/м<sup>3</sup>

Необхідна площа активного перерізу електрофільтра:

$$S = \frac{V}{3600 \cdot u}, \text{ м}^2 \quad (5.9)$$

де  $V$  – продуктивність електрофільтра, м<sup>3</sup>/год.

На основі завдання, довідкових матеріалів та обчислень за формулами (5.1) – (5.5) готуються наступні вихідні дані [1]:

- 1) швидкості дрейфу частинок пилу крупністю 1, 3, 5, 7, 9 і 10 мкм (середній радіус частинок – 0,5, 1,5, 2,5; 3,5; 4,5 і 5 мкм);
- 2) масова частка вказаних фракцій уловлюваного пилу, %;

3) значення  $T$  – відношення загальної площі осадження до площі активного перерізу для розглянутого типорозміру електрофільтра (значення  $T$  приведено в табл. 5.1) [1].

Приймається ряд значень швидкості газу в електрофільтрі і обчислюється за формулами (5.6) і (5.7) фракційний і загальний ступінь уловлювання пилу для прийнятих типорозмірів електрофільтрів. За отриманими даними для кожного з розглянутих типорозмірів електрофільтра будують криві залежностей  $\eta=f(u)$ .

За формулою (5.8) обчислюють необхідну ефективність очищення газу від пилу  $\eta_{mp}$ .

Поєднуючи на графіку отримані залежності  $\eta=f(u)$  і значення необхідної ефективності очищення газу, визначають типорозміри електрофільтрів, що забезпечують при прийнятних швидкостях газу  $u$  необхідну ефективність його очищення.

За формулою (5.9) визначають необхідну площу активного перерізу електрофільтра і по таблиці конструктивних характеристик (табл. 5.1) [1] вибирають оптимальний типорозмір електрофільтра.

## 5.2 Приклад розрахунку

Задача (приклад)

Розрахувати і вибрати електрофільтр типу ЕГА, призначений для очищення газів електросталеплавильної печі й аспіраційних установок цеху при наступних вихідних даних [1]:

- об'єм очищуваних газів за робочих умов –  $V=10^6$  м<sup>3</sup>/год;
- температура газу –  $t = 30$  °С;
- розрідження на вході в електрофільтр –  $p_1=1$  кПа;
- коефіцієнт динамічної в'язкості газу –  $\mu=18,65 \cdot 10^{-6}$  Па·с;
- початкова запиленість газу –  $z_1=1,4$  г/м<sup>3</sup>;
- необхідна запиленість очищеного газу –  $z_2=0,05$  г/м<sup>3</sup>.
- дисперсний (фракційний) склад уловлюваного пилу:

Крупність, мкм	0÷2	2÷4	4÷6	6÷8	8÷10	10÷20
Масова частка, %	52,0	22,0	6,4	7,6	2,7	9,3

## Рішення

Відповідно до заданого фракційного складу характеристики частинок пилу по фракціям наведені в табл. 5.2 [1].

Таблиця 5.2 – Характеристики частинок пилу [1]

Крупність, мкм	0÷2	2÷4	4÷6	6÷8	8÷10	10÷20
Середній розмір частинок, мкм	1	3	5	7	9	10
Середній еквівалентний радіус частинок $r$ , мкм	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5

Розрахунок виконується в наступній послідовності.

1. За формулою (5.1) визначається відносна щільність очищуваного газу, (тиск очищуваного газу  $p=p_{cm} - p_1$ ):

$$\beta = \frac{p \cdot (273 + t_{ct})}{p_{ct} \cdot (273 + t)} = \frac{(101,3 - 1) \cdot (273 + 20)}{101,3 \cdot (273 + 30)} = 0,957,$$

де  $p_{cm} = 101,3$  кПа,  $t_{cm} = 20$  °C – тиск і температура газу за стандартних умов, кПа і °C;

$$p = p_{cm} - p_1 = 101,3 - 1 = 100,3 \text{ кПа}$$

2. Визначається критична напруженість електричного поля за формулою (5.2):

$$\begin{aligned} E_{кр} &= 3,04 \cdot \left( \beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6 = \\ &= 3,04 \cdot \left( 0,957 + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{0,957}{0,001}} \right) \cdot 10^6 = 5,83 \cdot 10^6 \text{ В/м.} \end{aligned}$$

3. Визначається критична напруга корони за формулою (5.3):

$$\begin{aligned} U_{кр} &= E_{кр} \cdot R_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right) = \\ &= 5,83 \cdot 10^6 \cdot 0,001 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right) = 34,82 \cdot 10^3 \text{ В.} \end{aligned}$$

4. Визначається напруженість електричного поля при робочій напрузі  $U = 85$  кВ за формулою (5.4):

$$E = \left[ \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot H \cdot U \cdot (U - U_{кр})}{9 \cdot 10^9 \cdot \varepsilon_0 \cdot S_1^3 \cdot \left( \frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right)} \right]^{0,5} =$$

$$= \left[ \frac{8 \cdot 3,14 \cdot 0,0423 \cdot 0,15 \cdot 85 \cdot 10^3 \cdot (85 - 34,82) \cdot 10^3}{9 \cdot 10^9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,18^3 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right)} \right]^{0,5} = 4,9 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

5. Визначається швидкість дрейфу частинок пилу крупністю 1 мкм за формулою (5.5):

$$w = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot r}{\mu} = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot (4,9 \cdot 10^5)^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}{18,65 \cdot 10^{-6}} = 0,076 \text{ м/с,}$$

Аналогічно обчислюють швидкості дрейфу частинок крупністю 3, 5, 7, 9 і 10 мкм при відповідних середніх еквівалентних радіусах (див. табл. 5.2).

Результати розрахунку швидкості дрейфу частинок представлені в табл. 5.3 [1].

Таблиця 5.3 – Фракційний склад і швидкість дрейфу частинок пилу в електрофільтрі [1]

Показники	Розмір частинок пилу, мкм					
	0÷2	2÷4	4÷6	6÷8	2÷10	10÷20
Середній розмір частинок, мкм	1	3	5	7	9	10
Середній еквівалентний радіус $r$ , мкм	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5
Масова частка фракцій $\Phi_i$ , %	52,0	22,0	6,4	7,6	2,7	9,3
Швидкість дрейфу частинок, $w$ , м/с	0,076	0,228	0,380	0,532	0,684	0,761

Приймають позначення  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  типорозмірів електрофільтрів ЕГА за значенням  $T = S_0 / S$  (див. табл. 5.1):  $T_1 = 38,2, T_2 = 57,7, T_3 = 77,0, T_4 = 86,6, T_5 = 88,0, T_6 = 115,5$ .

Електрофільтри відповідно до прийнятого позначення типорозмірів представлені в табл. 5.4 [1].

Таблиця 5.4 – Прийняті позначення типорозмірів електрофільтрів і значення відношень загальної площі осаджувальних електродів до площі активного перерізу електрофільтрів ЕГА [1]

Прийняте позначення типорозміру електрофільтра	Типорозмір електрофільтра	Відношення загальної площі осаджувальних електродів до площі активного перерізу електрофільтра
$T_1$	ЕГА 1-10-6-4-2	38,2
$T_2$	ЕГА 1-10-6-4-3; ЕГА 1-10-6-6-2; ЕГА 1-14-7,5-4-3; ЕГА 1-14-7,5-6-2; ЕГА 1-20-7,5-4-3; ЕГА 1-20-7,5-6-2; ЕГА 1-20-9-6-2; ЕГА 1-30-7,5-4-3; ЕГА 1-30-7,5-6-2; ЕГА 1-30-9-6-2;	57,7

Прийняте позначення типорозміру електрофільтра	Типорозмір електрофільтра	Відношення загальної площі осаджувальних електродів до площі активного перерізу електрофільтра
	ЕГА 1-40-7,5-4-3; ЕГА 1-40-7,5-6-2; ЕГА 1-40-9-6-2.	
T <sub>3</sub>	ЕГА 1-14-7,5-4-4; ЕГА 1-20-7,5-4-4; ЕГА 1-30-7,5-4-4; ЕГА 1-40-7,5-4-4.	77,0
T <sub>4</sub>	ЕГА 1-10-6-6-3; ЕГА 1-14-7,5-6-3; ЕГА 1-20-7,5-6-3; ЕГА 1-20-9-6-3; ЕГА 1-30-7,5-6-3; ЕГА 1-30-12-6-3; ЕГА 1-40-7,5-6-3; ЕГА 1-40-9-6-3; ЕГА 1-40-12-6-2; ЕГА 2-48-12-6-3; ЕГА 2-56-12-6-3; ЕГА 2-76-12-6-3; ЕГА 2-88-12-6-3.	86,6
T <sub>5</sub>	ЕГА 1-30-9-6-3	88,0
T <sub>6</sub>	ЕГА 1-20-9-6-4; ЕГА 1-30-9-6-4; ЕГА 1-30-12-6-4; ЕГА 1-40-9-6-4; ЕГА 1-40-12-6-4; ЕГА 2-48-12-6-4; ЕГА 2-56-12-6-4; ЕГА 2-76-12-6-4; ЕГА 2-88-12-6-4.	115,5

Приймають значення швидкостей очищеного газу  $u$ : 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 м/с і обчислюють за формулами (5.6) і (5.7) фракційні і загальні ступені уловлювання пилу для зазначених швидкостей газу і наведених у табл. 5.3 та 5.4 значень  $w$  і  $T$ . Результати розрахунку представлені в табл. 5.5 [1].

Фракційна ступінь уловлювання пилу за формулою (5.6):

$$\begin{aligned} \eta_i &= 1 - \exp\left(-\frac{w \cdot T}{2 \cdot u}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{0,076 \cdot 38,2}{2 \cdot 0,6}\right) = \\ &= 1 - e^{-\frac{0,076 \cdot 38,2}{2 \cdot 0,6}} = 0,9110 \end{aligned}$$

Загальна ступінь уловлювання пилу за формулою (5.7):

$$\begin{aligned} \eta &= \sum_1^n \eta_i \cdot \phi_i = \eta_1 \cdot \phi_1 + \eta_2 \cdot \phi_2 + \eta_3 \cdot \phi_3 + \eta_4 \cdot \phi_4 + \eta_5 \cdot \phi_5 + \eta_6 \cdot \phi_6 = \\ &= 0,9110 \cdot 52,0 + 0,9993 \cdot 22,0 + 1 \cdot 6,4 + 1 \cdot 7,6 + 1 \cdot 2,7 + 1 \cdot 9,3 = 95,36\% \end{aligned}$$

Таблиця 5.5 – Результати розрахунку фракційного (частки) і загального (%) ступеня уловлювання пилу [1]

T	u	$\eta_1$	$\eta_3$	$\eta_5$	$\eta_7$	$\eta_9$	$\eta_{10}$	$\eta$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
T <sub>1</sub> =38,2	0,6	0,9110	0,9993	1	1	1	1	95,36
	0,8	0,8371	0,9957	0,9999	1	1	1	91,43
	1,0	0,7659	0,9872	0,9993	1	1	1	87,54
	1,2	0,7018	0,9735	0,9977	0,9998	1	1	83,89
	1,4	0,6455	0,9555	0,9944	0,9993	1	1	80,54
T <sub>2</sub> =57,7	0,6	0,9742	1	1	1	1	1	98,65
	0,8	0,9355	0,9998	1	1	1	1	96,64
	1,0	0,8884	0,9987	1	1	1	1	94,16
	1,2	0,8392	0,9959	0,9999	1	1	1	91,54

$T$	$u$	$\eta_1$	$\eta_3$	$\eta_5$	$\eta_7$	$\eta_9$	$\eta_{10}$	$\eta$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_3=77,0$	1,4	0,7912	0,9909	0,9997	1	1	1	88,94
	0,6	0,9924	1	1	1	1	1	99,60
	0,8	0,9743	1	1	1	1	1	98,66
	1,0	0,9464	0,9999	1	1	1	1	97,21
	1,2	0,9127	0,9994	1	1	1	1	95,44
$T_4=86,6$	1,4	0,8764	0,9982	1	1	1	1	93,53
	0,6	0,9959	1	1	1	1	1	99,78
	0,8	0,9837	1	1	1	1	1	99,15
	1,0	0,9628	1	1	1	1	1	98,06
	1,2	0,9356	0,9998	1	1	1	1	96,64
$T_5=88,0$	1,4	0,9047	0,9992	1	1	1	1	95,02
	0,6	0,9963	1	1	1	1	1	99,80
	0,8	0,9848	1	1	1	1	1	99,20
	1,0	0,9648	1	1	1	1	1	98,16
	1,2	0,9384	0,9998	1	1	1	1	96,79
$T_6=115,5$	1,4	0,9083	0,9993	1	1	1	1	95,21
	0,6	0,9994	1	1	1	1	1	99,96
	0,8	0,9959	1	1	1	1	1	99,78
	1,0	0,9876	1	1	1	1	1	99,35
	1,2	0,9743	1	1	1	1	1	98,66
	1,4	0,9566	1	1	1	1	1	97,74

За результатами розрахунку будуть графіки залежності ефективності електрофільтра від його типорозміру при різних швидкостях газу (див. рис. 5.1) [1].

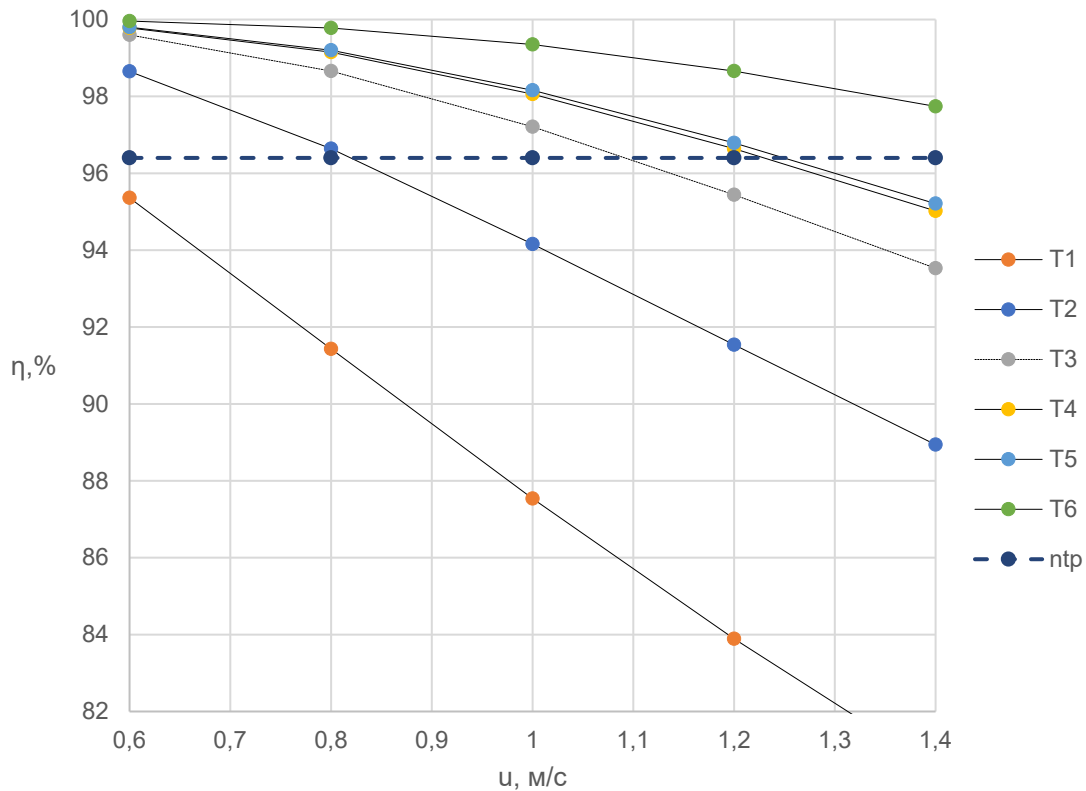


Рисунок 5.1 – Залежність ефективності очищення газу від швидкості газу і типорозміру електрофільтра  $T$  [1]

Необхідний ступінь уловлювання пилу при початковій запиленості газу  $z_1=1,4 \text{ г/м}^3$  і кінцевій  $z_2=0,05 \text{ г/м}^3$  визначається за формулою (5.8):

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} \cdot 100 = \frac{1,4 - 0,05}{1,4} \cdot 100 = 96,4 \%$$

Значення необхідного ступеню уловлення пилу ( $\eta_{\text{тр}}$ ) наносять на графік (рис. 5.1) [1]. Порівняння необхідної запиленості ( $\eta_{\text{тр}}$ ) та розрахункової ефективності електрофільтра при різних типорозмірах показує: можливість застосування для задовільного очищення газу типорозмір  $T_2$  – при швидкості газу до 0,8 м/с,  $T_3$  – при швидкості газу до 1,1 м/с,  $T_4$  і  $T_5$  – при швидкості газу до 1,2 м/с і  $T_6$  – у всьому діапазоні прийнятих у розрахунку швидкостей газу.

Досвід експлуатації електрофільтрів показує в якості найбільш кращої швидкості газу інтервал 1,0÷1,2 м/с [1]. Зокрема, при швидкості 1,2 м/с і  $\eta_{\text{тр}}=96,4\%$  приймаються до розгляду електрофільтри типорозмірів, які на графіку лежать вище лінії необхідного ступеня очищення (криві  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ ), оскільки електрофільтри з типорозмірами, які лежать під цією лінією, не забезпечують необхідний ступінь уловлювання пилу.

У розглянутому випадку доцільно встановити електрофільтр типорозміру  $T_4$ , який має менші габаритні розміри і металоемність конструкції в порівнянні з типорозмірами  $T_5$  і  $T_6$ .

При очищенні в електрофільтрі  $V = 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$  газу і швидкості газу 1,2 м/с необхідна площа активного перерізу електрофільтра визначається за формулою (5.9):

$$S = \frac{V}{3600 \cdot u} = \frac{1\,000\,000}{3600 \cdot 1,2} = 231,5 \text{ м}^2$$

Найбільш близьким за площею активного перерізу являється електрофільтр ЕГА 2-76-12-6-3, у якого  $S=246,6 \text{ м}^2$  (див. табл. 5.1). Швидкість очищуваного газу в цьому електрофільтрі складе:

$$U = \frac{V}{3600 \cdot S} = \frac{1\,000\,000}{3600 \cdot 246,6} = 1,13 \text{ м/с.}$$

При такій швидкості газу в електрофільтрі ступінь уловлювання пилу складе понад 97% (див. рис. 5.1), що відповідає умовам розрахунку.

### 5.3 Задача за варіантами

#### Задача

Розрахувати і вибрати електрофільтр типу ЕГА, призначений для очищення газів електросталеплавильної печі й аспіраційних установок цеху. Вихідні дані наведені у табл. 5.6 за варіантами. Вихідні дані, які є спільними для всіх варіантів, наступні:

- об'єм очищуваних газів за робочих умов –  $V=10^6$  м<sup>3</sup>/год;
- розрідження на вході в електрофільтр –  $p_1=1$  кПа;
- коефіцієнт динамічної в'язкості газу –  $\mu=18,65 \cdot 10^{-6}$  Па·с;
- необхідна запиленість очищеного газу –  $z_2=0,05$  г/м<sup>3</sup>.
- дисперсний (фракційний) склад уловлюваного пилу:

Приклад розрахунку наведено в п. 5.2.

Таблиця 5.6 – Вихідні дані за варіантами

№ варіанту	Температура газу $t$ , °С	Початкова запиленість газу $z_1$ , г/м <sup>3</sup>	Крупність, мкм					
			0÷2	2÷4	4÷6	6÷8	8÷10	10÷20
			Масова частка, %					
0 (приклад)	30	1,4	52,0	22,0	6,4	7,6	2,7	9,3
1	29	1,5	53	23	7,5	5,3	2,4	8,8
2	28	1,45	54	22	6,2	5,8	2,9	9,1
3	31	1,6	55	23	5,9	5,9	2,3	7,9
4	32	1,55	51	21	7,4	7,4	4,3	8,9
5	33	1,57	50	20	8,1	8,1	3,7	10,1
6	34	1,58	49	24	7,6	5,8	4	9,6
7	35	1,61	55	18	6,7	6,8	4,1	9,4
8	36	1,62	50	24	6,7	7,4	2,4	9,5
9	37	1,63	51	20	6,8	8,1	4,3	9,8
10	38	1,64	52	22	6,9	6,6	4,7	7,8
11	39	1,65	53	23	5,3	7,5	2,9	8,3
12	40	1,58	54	24	5,8	6,2	1,5	8,5
13	29	1,57	55	23	5,9	6,1	2,1	7,9
14	28	1,56	51	23	7,4	7,4	3,3	7,9
15	31	1,59	50	21	8,1	8,1	3,9	8,9
16	32	1,66	49	25	5,8	5,6	4,9	9,7
17	33	1,61	48	25	5,9	5,9	5,6	9,6
18	34	1,62	50	22	7,4	6,7	4,1	9,8
19	35	1,63	51	21	8,1	6,8	5,3	7,8
20	36	1,64	52	22	6,6	6,9	4,2	8,3

#### Питання для самоперевірки

1. Що позначає в назві типу електрофільтру аббревіатура ЕГА?
2. Які умовні позначення типорозміру електрофільтрів Вам відомі?
3. Який алгоритм основних дій під час розрахунку електрофільтрів?

## Перелік рекомендованих джерел

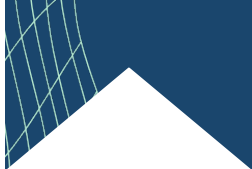
1. Гічов Ю.О. Очищення газів. Частина I : Конспект лекцій. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2015. 51 с.

2. Петрук В. Г., Васильківський І. В., Петрук Р. В., Крусір Г. В., Клименко М. О., Сакалова Г. В. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 1. Захист атмосфери : ел. підручник. Херсон : Олді-плюс, 2010. URL:

[https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/iebmd/severin\\_priodoohoronnii\\_tehnologii/5-8.html](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/iebmd/severin_priodoohoronnii_tehnologii/5-8.html) (дата звернення: 01.02.2024).

## Зміст та вимоги до контрольних точок

Назва контрольної точки	Опис контрольної точки, порядок її проходження та отримання балів
Робота на практичних заняттях	<p>Практичні роботи виконуються безпосередньо на занятті, що є бажаним, однак не обов'язковим; матеріали для виконання практичної роботи доступні в записі, які зберігаються в Microsoft Teams, та викладені в повному обсязі в Moodle. Оцінка за практичну роботу виставляється за фактом виконання та враховуючи правильність розрахунків. Якщо студент виконав роботу з помилками, то за згодою з викладачем може допрацювати свої розрахунки та підвищити оцінки, але не пізніше залікового тижня.</p> <p>Оцінка за захист роботи на практичному (семінарському) занятті виставляється в Moodle наприкінці заняття або продовж доби, після заняття, та може бути оскаржена одразу ж або продовж доби, після виставлення оцінки в Moodle.</p> <p><u>Мах 6 балів:</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– студент дав пряму і релевантну відповідь на поставлене питання з використанням обґрунтованого посилання на теоретичний матеріал та варіації зміни відповідь на зміну вхідних умов, в т.ч. у вигляді додаткових запитань / зміг стисло формалізувати вербально сутність проблеми за ситуацією, ідентифікувати ключові складові і пріоритети вирішення, запропонував логічне розв'язання та виконав вірно завдання і проявив організованість при оформленні розрахункової частини, а за потреби розрахунково-графічної частини (5 балів);</li><li>– оцінка ініціативності у роботі над проблемою, логічності та структурованості відповіді, здатності комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, в т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним і самокритичним (1 бали).</li></ul>



Додаток А

Приклад титульного аркушу комплекту робіт, виконаних здобувачем

**ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Кафедра безпеки праці та охорони довкілля**

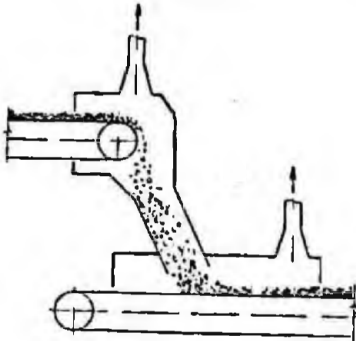
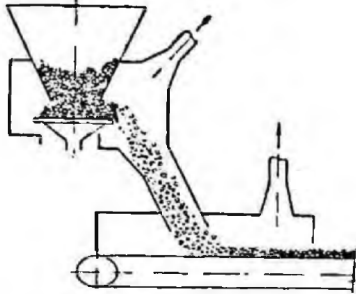
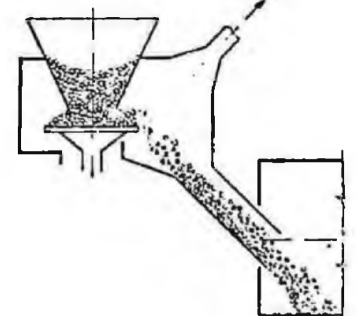
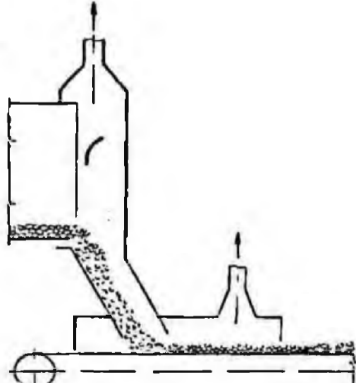
**ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ:**

Практична робота № \_\_ за варіантом № \_\_

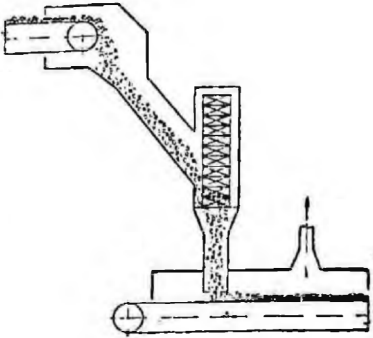
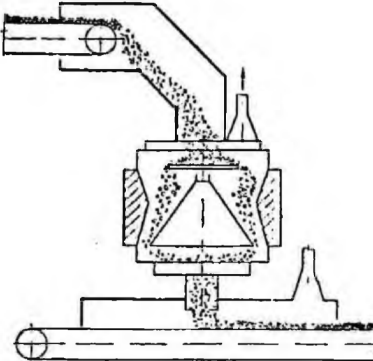
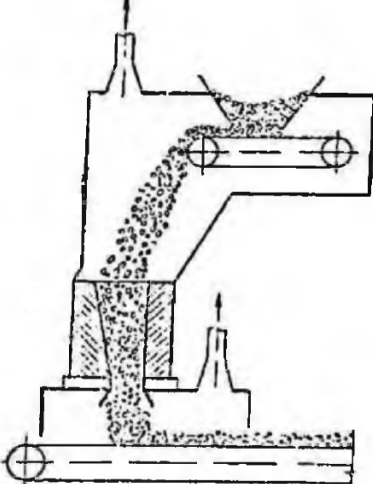
**Виконав:**  
Здобувач(ка) вищої освіти  
групи \_\_\_\_\_  
Прізвище І.П.

**Перевірила:**  
доц. Максимова Н.М.

Таблиця Б.1 – Розрідження в аспіраційних укриттях [4]

Вузол, який аспірується	Схема аспірації	Розрідження в укритті, Н/м <sup>2</sup>	
		верхнє	нижнє
Перевантаження: - з конвеєра на конвеєр		5	6 – 8
- з дискового живильника на конвеєр		6	8
- з дискового живильника у барабанний охолоджувач		6	15
Вивантаження з барабанного охолоджувача на конвеєр		15	8

Вузол, який аспірується	Схема аспірації	Розрідження в укрітті, Н/м <sup>2</sup>	
		верхнє	нижнє
Перевантаження з конвеєра у бункер  Дробарка: - молоткова реверсна  - молоткова нереверсна  - чотирьохвалкова		5	1 – 2
		8	-
		-	10
		-	6

Вузол, який аспірується	Схема аспірації	Розрідження в укритті, Н/м <sup>2</sup>	
		верхнє	нижнє
- дезинтегратор		-	15
- конусна		2	8
- щокова		2	8

Примітка. 1. Величина розрідження та площі нещільностей приведені по даним [4] експериментальних замірів місцевих відсмоктувачів фабрик гірничозбагачувальних комбінатів. В розрахунках слід приймати розрідження не менше, а площі нещільностей не більше приведених даних у [4].

2. Рекомендовані розрідження у верхніх укриттях слід враховувати лише при розрахунку аспірації перевантажень гарячих матеріалів молоткових реверсивних, конусних та щокових дробарок.

Для нижніх укриттів більше розрідження приймають при розрахунку перевантаження гарячих матеріалів і кускових ненагрітих матеріалів, менше – для дрібнозернистих і порошкоподібних матеріалів.

Для розрахунку аспірації бункерів, завантажених крізь відкриті отвори (завантажувальні щілини), приймати менше розрідження, а більше – при закритих отворах.

$B_H$  – ширина стрічки конвеєра, м;  $L$  – периметр укриття в плані, м;  $D_H$  – діаметр дискового живильника, м;  $D_6$  – діаметр барабану, м;  $B_3$  – ширина завантажувального отвору дробарки, м;  $F_{пр}$  – площа відкритих отворів, м<sup>2</sup>

## Методика розрахунку суми коефіцієнтів місцевих опорів [4]

Сума коефіцієнтів місцевих опорів (к.м.о.) характеризує гідравлічний опір жолоба і прилеглих до нього укриттів та являється одним з основних параметрів, що визначає кількість повітря, яке ежектується.

Під час визначення об'ємів аспірації технологічного обладнання величину цієї суми слід розраховувати з урахуванням напрямлення потоку повітря в жолобі та схеми розташування місцевих відсмоктувачів.

1. При русі повітря по жолобу з верхнього укриття в нижнє сума к.м.о. розраховується за формулами:

- при відсмоктуванні повітря лише з нижнього укриття

$$\zeta^H = \sum_{i=1}^N \zeta_{iH} + 2,4 \left( \frac{F}{F_H} \right)^2$$

- при відсмоктуванні

$$\zeta_{Ж}^H = \sum_{i=1}^N \zeta_{iH}$$

Коли повітря поступає по жолобу з нижнього укриття у верхнє, сума к.м.о. визначається за формулами:

- при відсмоктуванні повітря лише з верхнього укриття

$$\zeta^B = \sum_{i=1}^N \zeta_{iB} + 2,4 \left( \frac{F}{F_{H2}} \right)^2$$

- при відсмоктуванні повітря з верхнього і нижнього укриття

$$\zeta_{Ж}^B = \sum_{i=1}^N \zeta_{iB},$$

- де  $F$  – Площа перерізу жолоба у світлі нормально до поздовжньої вісі його в місці входу матеріалу в укриття, м<sup>2</sup>;
- $F_{B1}, F_{H2}$  – площі нещільностей верхнього та нижнього укриття, м<sup>2</sup>;
- $\zeta_{iH}, \zeta_{iB}$  – к.м.о.  $i$ -тої ділянки жолоба при русі повітря відповідно вниз і вгору

Вхід повітря з укриття в жолоб: при русі повітря догори  $\zeta'_{iB} = 0,7$ ; при русі повітря вниз  $\zeta'_{iH} = 0,3$ .

#### Поворот потоку в жолобі

Кут повороту, град	20	30	40	60
$\zeta'_i$	0,2	0,3	0,35	0,7

Плавне звуження (розширення) потоку в жолобі  $\zeta'_i = 0,2$ .

#### Решітка (сітка) грохоту

Відношення живого перерізу до загальної площі решітки	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\zeta'_i$	15	7,5	5	2	1

Вихід повітря з жолобу в укриття: при русі повітря вниз  $\zeta'_{iH} = 1,05$ ; при русі повітря вверх  $\zeta'_{iB} = 0,5$ .

Вихід повітря з внутрішньої камери у зовнішню (для укриття з подвійними стінками)

Відношення висоти щілини для проходу повітря до висоти укриття	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6
$\zeta'_i$	23	15	10	6,5	4,0	2,5

Таблиця Г.1 – Фізичні властивості повітря при атмосферному тиску [4]

Температура, °С	Парціальний тиск водяних парів, мм. рт. ст.	Щільність повітря, кг/м <sup>3</sup>		Вологовміст насиченого повітря, г/кг	Тепловміст насиченого повітря, кДж/кг
		сухого	насиченого		
10	9,21	1,247	1,242	7,63	29,2
11	9,84	1,243	1,237	8,16	31,6
12	10,51	1,239	1,232	8,73	34,0
13	11,23	1,234	1,227	9,33	36,5
14	11,98	1,229	1,222	9,97	39,2
15	12,78	1,226	1,218	10,64	41,9
16	13,63	1,221	1,213	11,36	44,8
17	14,53	1,217	1,208	12,12	47,7
18	15,47	1,213	1,204	12,93	50,7
19	16,47	1,209	1,199	13,78	54,0
20	17,53	1,205	1,194	14,68	57,4
21	18,65	1,201	1,190	15,64	60,7
22	19,82	1,197	1,185	16,66	64,5
23	21,07	1,193	1,180	17,73	68,3
24	22,37	1,189	1,177	18,87	72,0
25	23,75	1,185	1,170	20,07	76,2
26	25,21	1,181	1,166	21,34	80,4
27	26,75	1,177	1,161	22,68	85,0
28	28,35	1,173	1,156	24,10	89,6
29	30,04	1,169	1,151	25,60	94,2
30	31,82	1,165	1,147	27,18	99,7
31	33,70	1,161	1,142	28,84	105
32	35,66	1,157	1,137	30,63	110
33	37,73	1,154	1,132	32,49	116
34	39,90	1,150	1,127	34,47	120
35	42,18	1,146	1,122	36,55	128
36	44,56	1,142	1,117	38,80	136
37	47,08	1,139	1,112	41,07	142
38	49,70	1,135	1,107	43,52	150
39	52,45	1,131	1,102	46,11	157
40	55,34	1,128	1,096	48,85	166
41	58,36	1,124	1,092	51,73	174
42	61,51	1,121	1,086	54,78	183
43	64,82	1,117	1,081	58,00	193
44	68,28	1,114	1,076	61,40	203
45	71,90	1,110	1,070	64,99	213
46	75,68	1,107	1,065	68,79	224
47	79,63	1,103	1,059	72,80	235
48	83,75	1,100	1,054	77,03	247
49	88,06	1,096	1,048	81,52	250
50	92,56	1,093	1,043	86,26	273

Температура, °С	Парціальний тиск водяних парів, мм. рт. ст.	Щільність повітря, кг/м <sup>3</sup>		Вологовміст насиченого повітря, г/кг	Тепловміст насиченого повітря, кДж/кг
		сухого	насиченого		
51	97,25	1,090	1,037	91,27	288
52	102,1	1,086	1,031	96,57	303
53	107,2	1,083	1,025	102,2	319
54	112,6	1,080	1,019	108,1	335
55	118,1	1,076	1,013	114,5	353
56	123,9	1,073	1,007	121,1	371
57	129,8	1,070	1,001	128,0	394
58	136,1	1,066	0,994	135,8	410
59	142,7	1,063	0,988	143,8	435
60	149,5	1,060	0,981	152,3	456
61	156,5	1,057	0,974	161,3	482
62	163,8	1,054	0,967	171,0	511
63	171,5	1,051	0,961	181,2	536
64	179,4	1,048	0,954	192,2	569
65	187,6	1,044	0,947	203,9	599
66	196,2	1,041	0,940	216,5	628
67	205,1	1,038	0,932	230,0	670
68	214,3	1,035	0,925	244,3	708
69	223,9	1,032	0,917	259,7	754
70	233,8	1,029	0,909	276,3	795
71	244,1	1,026	0,901	294,3	846
72	254,8	1,023	0,893	313,7	900
73	265,8	1,020	0,885	334,6	955
74	277,3	1,017	0,877	357,3	1020
75	289,2	1,014	0,868	382,1	1080
76	301,5	1,011	0,860	409,1	1160
77	314,3	1,009	0,851	438,5	1230
78	327,5	1,006	0,842	471,0	1320
79	341,1	1,003	0,832	506,6	1420
80	355,3	1,000	0,823	546,0	1530
81	369,9	0,997	0,814	589,9	1640
82	385,1	0,994	0,804	638,8	1780
83	400,7	0,992	0,794	693,7	1930
84	416,9	0,989	0,783	755,8	2090
85	433,6	0,986	0,773	826,4	2280
86	450,9	0,983	0,762	907,3	2500
87	468,7	0,981	0,752	1001	2750
88	487,2	0,978	0,741	1110	3050
89	506,2	0,975	0,729	1240	3400
90	525,9	0,973	0,718	1400	3820
91	546,2	0,970	0,706	1590	4350
92	567,1	0,967	0,694	1830	4980
93	588,7	0,965	0,682	2140	5820
94	614,0	0,962	0,668	2616	7080
95	634,0	0,959	0,656	3730	8500
96	657,7	0,957	0,643	4000	10800

Температура, °С	Парціальний тиск водяних парів, мм. рт. ст.	Щільність повітря, кг/м <sup>3</sup>		Вологовміст насиченого повітря, г/кг	Тепловміст насиченого повітря, кДж/кг
		сухого	насиченого		
97	682,1	0,955	0,630	5450	14700
98	707,3	0,951	0,616	8350	22500
99	733,3	0,949	0,602	17000	46000
100	760,0	0,947	0,588	-	-
120	н.д.	0,898	н.д.	н.д.	н.д.
140	н.д.	0,854	н.д.	н.д.	н.д.
160	н.д.	0,815	н.д.	н.д.	н.д.
180	н.д.	0,779	н.д.	н.д.	н.д.
200	н.д.	0,746	н.д.	н.д.	н.д.
250	н.д.	0,674	н.д.	н.д.	н.д.
300	н.д.	0,615	н.д.	н.д.	н.д.
350	н.д.	0,566	н.д.	н.д.	н.д.
400	н.д.	0,524	н.д.	н.д.	н.д.
500	н.д.	0,456	н.д.	н.д.	н.д.
600	н.д.	0,404	н.д.	н.д.	н.д.
700	н.д.	0,362	н.д.	н.д.	н.д.
800	н.д.	0,329	н.д.	н.д.	н.д.
900	н.д.	0,301	н.д.	н.д.	н.д.
1000	н.д.	0,277	н.д.	н.д.	н.д.
1100	н.д.	0,257	н.д.	н.д.	н.д.



*Навчально-методичне видання*

**Наталія Миколаївна Максимова**

**ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ**

**методичні вказівки до виконання практичних робіт**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції