

Міністерство освіти і науки України
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Г.Б. Кожемякін, Д.В. Прутцьков, А.В. Вагін

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ

Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
«Технології захисту атмосфери та водних екосистем»
для здобувачів ступеня вищої освіти магістра
спеціальності 183 Технології захисту навколишнього середовища
освітньо-професійної програми
«Технології захисту навколишнього середовища»

Затверджено вченою радою ЗНУ
Протокол № 3 від 24.10.23

Запоріжжя

2023

УДК 66.074:628.54:628.3
К 584

Кожемякін Г.Б., Прутцьков Д.В., Вагін А.В. Технології захисту атмосфери: методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Технології захисту атмосфери та водних екосистем» для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 183 Технології захисту навколишнього середовища освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища». Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2023. 73с.

Методичні рекомендації визначають принципи та методики розрахунку газоочисних апаратів, які використовуються при розробці та проєктуванні технологічних схем очистки газових викидів промислових підприємств. Вони включають методики та приклади розрахунків основних газоочисних апаратів, а також визначення характеристик газових потоків, що підлягають очистці.

Призначені для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 183 Технології захисту навколишнього середовища, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Технології захисту навколишнього середовища».

Рецензент

О.Г. Добровольська, кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва та господарства

Відповідальний за випуск

Ю.О. Бєлоконь, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	7
2. ЗАГАЛЬНІ РОЗРАХУНКИ	8
2.1 Гази і газові суміші	8
2.2 Вологий газ	10
2.3 Розрахунок температури суміші газів	12
2.3.1 Основні положення і залежності	12
2.3.2 Приклад розрахунку	13
3. РОЗРАХУНОК ГАЗООЧИСНИХ АПАРАТІВ	15
3.1 Розрахунок порожнистого скрубера	15
3.1.1 Пристрій і принцип дії порожнистого скрубера	15
3.1.2 Методика розрахунку порожнистого скрубера	17
3.1.3 Приклад розрахунку порожнистого скрубера.	19
3.2 Розрахунок скрубера Вентурі	24
3.2.1 Пристрій і принцип дії скрубера Вентурі	24
3.2.2 Методика розрахунку скрубера Вентурі	25
3.2.3 Приклад розрахунку скрубера Вентурі	28
3.3 Розрахунок гравітаційного пиловловлювача	31
3.3.1 Пристрій і принцип дії гравітаційного пиловловлювача	31
3.3.2 Методика розрахунку гравітаційного пиловловлювача	31
3.3.3 Приклад розрахунку гравітаційного пиловловлювача	34
3.4 Розрахунок циклону	35
3.4.1 Пристрій і робота циклона	35
3.4.2 Методика розрахунку циклону	37
3.4.3 Приклад розрахунку циклону	40
3.5 Розрахунок батарейного циклону	44
3.5.1 Пристрій і принцип дії батарейного циклону	44
3.5.2 Методика розрахунку батарейного циклону	46
3.5.3 Приклад розрахунку батарейного циклону	48
3.6 Розрахунок тканинного (рукавного) фільтра	51
3.6.1 Пристрій і принцип дії тканинного (рукавного) фільтра	51
3.6.2 Методика розрахунку тканинного (рукавного) фільтру	52

3.6.3 Розрахунок рукавного фільтру типу ФРІР	55
3.7 Розрахунок сухого пластинчастого електрофільтру	59
3.7.1 Пристрій і принцип дії сухого пластинчастого електрофільтру .	59
3.7.2 Методика розрахунку електрофільтра	60
3.7.3 Приклад розрахунку електрофільтру типу ЕГА	63
Додаток А	68
Додаток Б	58
Додаток В	69
Додаток Г	69
Додаток Д	70
Додаток Е	71
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	73

ВСТУП

Зі зростанням промислового виробництва швидко зростало споживання вугілля, руд, нафти та інших матеріалів, спалювання і переробка яких приводили до значного і дедалі зростаючого забруднення атмосфери газами і пилом. На долю підприємств чорної і кольорової металургії припадає близько 20-25% загальної кількості шкідливих викидів в атмосферу, а в районах розташування великих металургійних заводів і комбінатів більше 50% від усієї кількості забруднень.

Забруднене повітря погано впливає не тільки на людей і тварин, а й на рослинний світ, завдає величезних матеріальних збитків, підвищуючи корозію металів, руйнуючи будівельні та інші матеріали.

В даний час питанням захисту навколишнього середовища від шкідливого впливу викидів промислових підприємств приділяється велика увага. Підприємства чорної металургії України, що виділяють в атмосферу багатьох промислових центрів сотні тисяч тон шкідливих домішок на рік, відчувають гостру потребу у фахівцях в галузі санітарного очищення газів.

Частину проблем захисту повітряного басейну від забруднення газами можна вирішити удосконалюючи існуючі газоочисні апарати, розробкою нових конструкцій і технологічними засобами.

До теперішнього часу розроблені як теоретичні основи вловлювання пилу і газових компонентів, так і методи розрахунку різноманітної апаратури для цих цілей, що успішно використовуються при знешкодженні промислових викидів.

У методичних вказівках розглянуті методики розрахунків різноманітної апаратури для очищення промислових газів, а також приведені вказівки для виконання лабораторних робіт.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Забруднене повітря погано впливає не тільки на людей і тварин, а й на рослинний світ, завдає величезних матеріальних збитків, підвищуючи корозію металів, руйнуючи будівельні та інші матеріали.

В даний час питанням захисту навколишнього середовища від шкідливого впливу викидів промислових підприємств приділяється велика увага. Підприємства чорної металургії України, що виділяють в атмосферу багатьох промислових центрів сотні тисяч тон шкідливих домішок на рік, відчувають гостру потребу у фахівцях в галузі санітарного очищення газів. Частину проблем захисту повітряного басейну від забруднення газами можна вирішити удосконалюючи існуючі газоочисні апарати, розробкою нових конструкцій і технологічними засобами.

2. ЗАГАЛЬНІ РОЗРАХУНКИ

2.1 Гази і газові суміші

Реальні гази при малих тисках за своїми властивостями не дуже відрізняються від ідеального газу, що дозволяє в умовах газоочисних споруд металургійних заводів застосовувати закони ідеальних газів.

Фізичний стан газу або пару визначається такими параметрами стану: питомим обсягом, тиском, температурою, ентальпією, внутрішньою енергією і ентропією. Найбільш часто стан газу визначають якимись трьома параметрами. Наприклад, питомим обсягом V , тиском P і температурою T . Ці параметри пов'язані між собою рівнянням стану:

$$PV=RT, \quad (2.1)$$

де R - газова постійна, Дж/(кг·К);

$$R = \frac{8314,4}{M}, \quad (2.2)$$

де M - молекулярна маса, кмоль.

Остання залежність дозволяє легко визначати газову постійну будь-якого газу. Наприклад, для кисню ($M_{O_2} = 32$ кг/кмоль):

$$R = \frac{8314,4}{32} = 260 \text{ Дж/(кг·К)};$$

для водню:

$$R = \frac{8314,4}{2} = 4157,2 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

При робочих умовах щільність газу, кг/м³:

$$\rho = \frac{273 \cdot P}{101325 \cdot T} \cdot \rho_0; \quad (2.3)$$

При робочих умовах обсяг газу, м³/кг:

$$V = \frac{101325 \cdot T}{273 \cdot P} \cdot V_0. \quad (2.4)$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості газу не залежить від тиску. Він визначається за формулою, Па·с:

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C'}{T + C'} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5}, \quad (2.5)$$

де μ_0 - динамічний коефіцієнт в'язкості газу при нормальних умовах, Па·с;

C' - постійна Сезерленда;

T – абсолютна температура, К, $T = 273 + t_r$.

Параметри і фізичні властивості деяких газів наведені в додатку А, Б.

При відсутності хімічних реакцій кожен з газів, який входить в суміш, займає об'єм, рівний об'єму всієї суміші, і розвиває парціальний тиск, що відповідає тиску, який він мав би, займаючи один весь об'єм суміші при тій же температурі. Відповідно до закону Дальтона загальний тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, що складають суміш P_i , тобто:

$$P = \sum_1^n P_i. \quad (2.6)$$

Склад газової суміші може бути заданий об'ємними r_i і масовими частками m_i або відсотками. Між об'ємним і масовим вмістом компонентів газової суміші існує наступна залежність:

$$m_i = \frac{r_i \rho_i}{\rho}, \quad (2.7)$$

де ρ_i і ρ - щільність відповідно компонента та газової суміші, кг/м³.

Газова постійна суміші газів, Дж / (кг·К):

$$R = 0,01 \sum_1^n m_i R_i, \quad (2.8)$$

де R_i - газові постійні компонентів суміші, Дж / (кг·К).

Тут і далі m_i і r_i виражені у відсотках.

Парціальний тиск компонентів суміші газів, Па:

$$P_i = 0,01 P \cdot r_i. \quad (2.9)$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості суміші газів, Па·с:

$$\mu = 0,01 \sum_1^n \mu_i r_i, \quad (2.10)$$

де μ_i - динамічні коефіцієнти в'язкості компонентів суміші, Па·с.

Постійна Сезерленда для газової суміші:

$$C' = 0,01 \sum_1^n C'_i r_i , \quad (2.11)$$

де C'_i - постійні Сезерленда для компонентів газової суміші.

Щільність суміші газів, кг/м³:

$$\rho = 0,01 \sum_1^n \rho_i r_i . \quad (2.12)$$

Розрізняють теплоємності при постійному тиску C_p і при постійному обсязі C_v . Відлік теплоємності проводять від 0°С. У розрахунках газоочисних апаратів використовують масові й об'ємні теплоємності. Між ними існують наступні співвідношення:

$$C = c \cdot \rho ,$$

$$c = \frac{C}{\rho} , \quad (2.13)$$

де C , c - теплоємність відповідно об'ємна, Дж/(м³·°С) і масова Дж/(кг·°С).
Теплоємності сумішей газів, відповідно Дж/(кг·°С) і Дж/(м³·°С):

$$c = 0,01 \sum_1^n c_i m_i , \quad (2.14)$$

$$C = 0,01 \sum_1^n C_i r_i . \quad (2.15)$$

Ентальпія суміші газів, Дж/м³:

$$i = 0,01 \sum_1^n i_i r_i . \quad (2.16)$$

2.2 Вологий газ

Промислові гази містять деяку кількість водяної пари, тобто являють собою суміш сухого газу і водяної пари (вологі гази). За законом Дальтона тиск вологого газу (суміші) є сумою парціальних тисків сухого газу P_c і водяної пари P_n , тобто:

$$P = P_c + P_n . \quad (2.17)$$

Масу пари, що міститься в 1м³ вологого газу, називають абсолютною вологістю f . Чисельно вона дорівнює щільності пара ρ_n , кг/м³.

Відношення абсолютної вологості до абсолютної вологості насиченої пари тієї ж температури і тиску називається відносною вологістю або ступенем насичення:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_i} = \frac{\rho_n}{\rho_i}, \quad (2.18)$$

де P_n і ρ_n - відповідно тиск, Па, і щільність водяної пари, кг/м³, що насичує газ за даних температури і тиску.

При нагріванні вологого газу його відносна вологість зменшується (за рахунок збільшення P_n), а при підвищенні тиску - збільшується.

Вологий газ характеризується також вологовмістом d , що представляє відношення маси пари у вологому газі до маси сухого газу.

Якщо відомі вологовміст d і щільність сухого газу ρ_c , то його абсолютна вологість, кг/м³:

$$f = d \cdot \rho_c. \quad (2.19)$$

Вміст компонентів газової суміші з урахуванням вологості можна визначити за формулою, %:

$$r_i = \frac{r_{ic}}{1 + \frac{f_0}{0,804}}, \quad (2.20)$$

де r_{ic} - вміст компонентів в сухому газі, %;

f_0 - абсолютна вологість газу, приведена до нормальних умов, кг/м³;

0,804 - густина водяної пари при нормальних умовах, кг/м³.

Об'ємна частка водяної пари в газі, %:

$$r_{H_2O} = 100 + \sum_1^n r_i. \quad (2.21)$$

Густина вологого газу за робочих умов, кг/м³:

$$\rho = \frac{\rho_{oc} + f_0}{1 + \frac{f_0}{0,804}} \cdot \frac{273 \cdot P}{101325 \cdot T}, \quad (2.22)$$

де ρ_{oc} - густина сухого газу при нормальних умовах, кг/м³;

P - тиск газу, Па;

T - температура газу, К.

Об'єм вологого газу за робочих умов, м³:

$$V = V_{oc} \left(1 + \frac{f_0}{0,804} \right) \cdot \frac{101325 \cdot T}{273 \cdot P}, \quad (2.23)$$

де V_{oc} - об'єм сухого газу при нормальних умовах, м³.

Якщо відома абсолютна вологість газу за робочих умов f , то його вологість при нормальних умовах (приведена до нормальних умов), кг/м³:

$$f_0 = f \frac{101325 \cdot T}{273}. \quad (2.24)$$

Для наближених обчислень абсолютної вологості газу можна скористатися залежністю, кг/м³:

$$f = \frac{P_n}{R_n T} \cdot \frac{P}{P - P_n}, \quad (2.25)$$

де P_n і R_n - відповідно парціальний тиск, Па, і газова постійна водяної пари, Дж/(кг·К);

P і T - відповідно тиск, Па, і температура газу, К.

При визначенні абсолютної вологості насиченого водяною парою газу f_n в формулу (2.29) підставляється парціальний тиск насиченої пари P_n , відповідний заданій температурі T .

2.3 Розрахунок температури суміші газів

2.3.1 Основні положення і залежності

При зміні двох газів, що мають різні температури, температура суміші визначається за допомогою балансових рівнянь:

$$V_{01}(i_1^t - i_1^{t_1}) = V_{02}(i_2^{t_2} - i_2^t), \quad (2.26)$$

$$V_{01}(c_1^t t - c_1^{t_1} t_1) = V_{02}(c_2^{t_2} t_2 - c_2^t t), \quad (2.27)$$

де V_{01} і V_{02} - об'єми при нормальних умовах компонентів суміші, м³/с;

i_1^t і $i_1^{t_1}$ - ентальпії першого компонента суміші газів відповідно при його температурі t і температурі суміші t_1 , Дж/м³;

$i_2^{t_2}$ і i_2^t - ентальпії другого компонента відповідно при його температурі t_2 і температурі суміші t , Дж/м³;

c_1^t і $c_1^{t_1}$ - об'ємні ізобарні теплоємності першого компонента суміші відповідно при температурах t і t_1 , Дж / (м³·°C);

$c_2^{t_2}$ і c_2^t - об'ємні ізобарні теплоємності другого компонента суміші відповідно при t_2 і t , Дж / (м³·°C).

Об'єм суміші газів при нормальних умовах, м³/с:

$$V_0 = V_{01} + V_{02}. \quad (2.28)$$

Якщо відомі (або задані) об'єми, хімічні склади і температури компонентів суміші газів, то попередньо визначивши за формулою (2.19) теплоємності $c_1^{t_1}$ і $c_2^{t_2}$ та для передбачуваної температури суміші t' теплоємності $c_1^{t'}$ і $c_2^{t'}$, обчислюють температуру суміші газів, °C:

$$t = \frac{V_{01}c_1^{t_1}t_1 + V_{02}c_2^{t_2}t_2}{V_{01}c_1^{t'} + V_{02}c_2^{t'}}. \quad (2.29)$$

Для отриманого значення температури суміші газів визначають теплоємності компонентів суміші і знову по (2.33) обчислюють її температуру. Аналогічним чином знаходять наступні значення температури суміші газів до тих пір, поки її значення будуть відрізнятися менш ніж на 3%.

Найчастіше зустрічається завдання, коли відомі величини V_{01} , $i_1^{t_1}$, t_1 і t_2 , а необхідно визначити об'ємну витрату другого компонента V_{02} забезпечує отримання заданої температури суміші газів t . Знаючи хімічний склад компонентів суміші, за формулою (2.20) визначаємо значення ентальпій компонентів суміші при температурі t - i_1^t і i_2^t .

З балансового рівняння (2.30) впливає відношення компонентів суміші, що забезпечує одержання заданої температури t ,

$$\frac{V_{02}}{V_{01}} = \frac{i_1^t - i_1^{t_1}}{i_2^{t_2} - i_2^t}. \quad (2.30)$$

Розв'язуючи це рівняння спільно з залежністю (2.32), визначаємо вміст компонентів в суміші газів.

Значення об'ємних ізобарних теплоємностей і ентальпій деяких газів наведені в додатках В і Г.

2.3.2 Приклад розрахунку

Для підвищення до 100 °C температури газів мартенівської печі після мокрого газоочищення паралельно встановлюється апарат сухого тонкого очищення газу (наприклад, високотемпературний тканинний фільтр). Частина газу V_{02} відбирається перед котлом-утилізатором (КУ) мартенівської печі, проходить сухе очищення і з температурою $t_2 = 500^\circ\text{C}$ надходить в газохід перед димотягом (екстаустером), де змішується з основною масою газу, що пройшла мокре

газоочищення, що має температуру $t_1 = 55^\circ\text{C}$. Загальна витрата вологих газів при нормальних умовах $V_0 = 150000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Об'ємна частка сухого газу мартенівської печі, %: $\text{CO}_2 - 7,5$; $\text{O}_2 - 12,5$; $\text{N}_2 - 80$.

Масова концентрація парів в газі перед мокрим газоочищенням (перед КУ) $f_{02} = 60 \text{ г/м}^3$ при нормальних умовах. Після мокрого газоочищення відносна вологість газу $\varphi = 1$. У цьому випадку при $t_1 = 55^\circ\text{C}$ масова концентрація водяної пари $f_1 = 0,1044 \text{ кг/м}^3$ (див. додаток Д).

Оскільки наведене значення f_1 відноситься до атмосферного тиску, то абсолютна вологість газу при нормальних умовах (формула (2.24)):

$$f_{01} = 0,1044 \frac{273 + 55}{273} = 0,125 \text{ кг/м}^3.$$

Об'ємна частка компонентів у газовій суміші з урахуванням водяної пари (тобто у вологому газі) визначається по формулам (2.24), (2.25).

Об'ємна частка CO_2 у вологому газі в даному випадку становить (формула (2.20)):

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{7,5}{1 + \frac{0,125}{0,804}} = 6,49 \text{ \%}.$$

Об'ємна частка $\text{O}_2 - 10,82\%$, $\text{N}_2 - 69,26\%$, водяної пари:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 100 - (6,49 + 10,82 + 69,26) = 13,43 \text{ \%}.$$

Ентальпія цього компонента (формула (2.16)):

- при 55°C :

$$i_1^t = 0,01(93,5 \cdot 6,49 + 72,5 \cdot 10,82 + 70,95 \cdot 69,26 + 82,9 \cdot 13,43) = 74,19 \text{ кДж/м}^3;$$

- при 100°C :

$$i_1^t = 0,01(170,0 \cdot 6,49 + 131,9 \cdot 10,82 + 129,8 \cdot 69,26 + 150,7 \cdot 13,43) = 135,44 \text{ кДж/м}^3.$$

Склад і ентальпію газу перед КУ визначають аналогічним чином.

Об'ємна частка компонентів у газі перед КУ, %: $\text{CO}_2 - 6,98$; $\text{O}_2 - 11,63$; $\text{N}_2 - 74,44$; $\text{H}_2\text{O} - 6,95$.

Ентальпія цього компонента:

- при 100°C :

$$i_2^t = 0,01(170,0 \cdot 6,98 + 131,9 \cdot 11,63 + 129,8 \cdot 74,44 + 150,7 \cdot 6,95) = 134,3 \text{ кДж/м}^3;$$

- при 500°C :

$$i_2^{t_2} = 0,01(996,5 \cdot 6,98 + 699,2 \cdot 11,63 + 664,1 \cdot 74,44 + 794,7 \cdot 6,95) = 700,46 \text{ кДж/м}^3.$$

Відношення компонентів суміші, що забезпечує задану температуру суміші $t = 100^\circ\text{C}$, становить (формула (2.30)):

$$\frac{V_{02}}{V_{01}} = \frac{135,44 - 74,19}{700,46 - 134,3} = 0,108.$$

За умовою виконуваного розрахунку (формула (2.28)):

$$V_0 = V_{01} + V_{02} = 150000 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Підставивши $V_{01} = V_{02}/0,108$, отримаємо:

$$V_{02} = \frac{V_0}{1 + \frac{1}{0,108}} = \frac{150000}{1 + \frac{1}{0,108}} = 14621 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$\frac{V_{02}}{V_0} = \frac{14621}{150000} = 0,0975.$$

Таким чином, для отримання температури суміші $t = 100^\circ\text{C}$ необхідно в даному випадку відбирати перед КУ для очищення сухим способом 9,75% газу.

3. РОЗРАХУНОК ГАЗООЧИСНИХ АПАРАТІВ

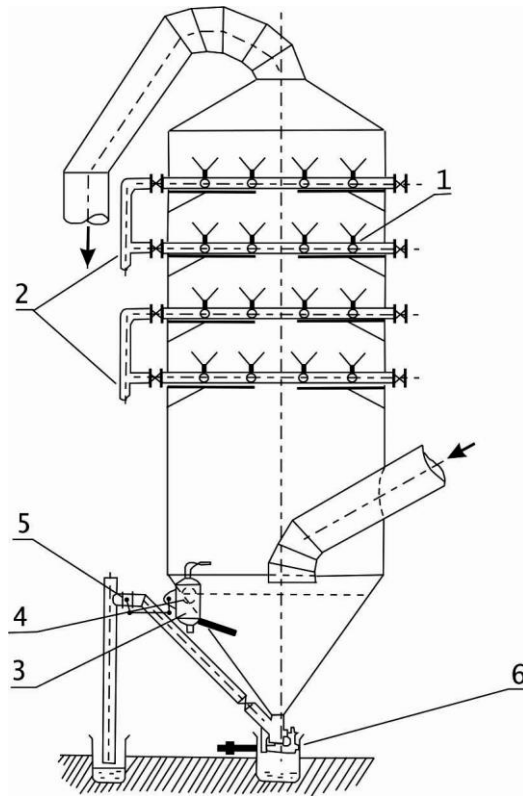
3.1 Розрахунок порожнистого скрубера

3.1.1 Пристрій і принцип дії порожнистого скрубера

Порожністі скрубери, що застосовуються в металургійному виробництві, є вертикальні циліндри діаметром до 9м, загальною висотою до 40м (рис. 3.1). Їх гідравлічний опір зазвичай не перевищує 250 Па.

Газ, що поступає на очищення, подається по похилому газоходу в нижню частину скрубера і піднімається по апарату вгору зі швидкістю 0,6 ... 1,2 м/с.

Останнім часом почали застосовувати швидкісні скрубери зі швидкістю газу 5...8м/с, але в цьому випадку після скрубера необхідно встановлювати краплевловлювач. У верхній частині скрубера розташовані 3 - 4 яруси зрошення, що складаються з відцентрових форсунок грубого розпилю. Вода до форсунок подається під тиском 0,3 ... 0,4 МПа.



1 - форсунки, що зрошують; 2 - підведення води до зон зрошення;
 - поплавкова камера; 4 - поплавок, 5 - дросель-регулятор; 6 - клапан

3

Рисунок 3.1 - Схема скрубера підвищеного тиску

Водяні краплі, які утворюються, падають під дією сили тяжіння назустріч газу, що очищається. Вловлювання частинок пилу краплями води відбувається під дією інерційного і дифузійного механізмів, гідродинамічних і електростатичних сил і турбулентної дифузії. Вода, що містить уловлену пил (шлам), збирається в нижній частині (бункері) скрубера. Очищений газ відводиться через газоходи, розташовані у верхній частині апарата. У скруберах підвищеного тиску для випуску шламу передбачено спеціальний пристрій, що складається з камери поплавка і дроселя-регулятора, що підтримує заданий рівень шламу в бункері.

Найбільша ефективність при інерційному осадженні частинок пилу на краплях води в порожніх скруберах досягається при розмірах крапель $d_k = 0,6 \dots 1,0$ мм. Питома витрата води залежить від запиленості газу, який надходить на очищення, і може досягати $6 \dots 8$ кг/м.

Порожнисті скрубери забезпечують високий ступінь вловлювання пилу більше 10мкм і мало ефективні при вловлюванні частинок пилу розміром менше 5мкм.

Поряд з вловлюванням пилу в скруберах інтенсивно протікають тепло - і масообмінні процеси. Газ, що проходить через скрубера, найчастіше охолоджується до $40 \dots 50^\circ\text{C}$ і зволожується зазвичай до стану насичення.

3.1.2 Методика розрахунку порожнистого скрубера

Кількість теплоти, що передається в скрубери від газу до води, кВт:

$$Q = V_0(i_1 - i_2), \quad (3.1)$$

де V_0 - об'ємна витрата газу при нормальних умовах, м³/с;

i_1 і i_2 - ентальпія газу відповідно на вході і виході з скрубера, кДж/м³.

Середня різниця температур між газом і водою в скрубери, °С:

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_k) - (t_2 - t_n)}{\ln \frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_n}}, \quad (3.2)$$

де t_1 і t_2 - відповідно початкова та кінцева температури газу, °С;

t_1 і t_k - відповідно початкова та кінцева температура води, °С.

Зазвичай t_k приймають на 5 ... 10°С нижче температури мокрого термометра (табл.3.1).

Таблиця 3.1 - Температура мокрого термометра

Початкова вологість газу, г / м ³	Початкова температура газу, °С						
	100	200	300	400	500	750	1000
25	38,5	49,5	57,0	62,0	65,5	72,5	77,5
50	44,0	53,5	59,5	64,0	67,5	74,0	78,5
100	52,5	59,0	63,5	68,0	70,5	76,5	80,5
200	61,0	66,5	70,0	72,5	75,5	79,5	-
300	68,0	71,5	74,0	78,5	-	-	-

Витрата води на скрубери визначається за кількістю теплоти, що передається від газу до води, кг/с:

$$M_s = \frac{Q}{\varphi \cdot (i_n - i_n) + (1 - \varphi) \cdot (i_k - i_n)}, \quad (3.3)$$

де φ - коефіцієнт випаровування води в скрубери;

i_n - ентальпія насиченої пари при середній температурі газу в скрубери кДж/кг;

i_n і i_k - відповідно початкова та кінцева ентальпія води, кДж/кг.

Коефіцієнт випаровування (відношення кількості рідини, що випарувалася, до загальної кількості рідини, що надходить в скрубери) зазвичай приймається в наближених розрахунках, рівним 0,5.

Питома витрата води на зрошення, кг/м³ газу:

$$m = \frac{M_e}{V_1}, \quad (3.4)$$

де V_1 - об'ємна витрата газу за робочих умов на вході в скруббер, м³/с.

Необхідний обсяг скрубера, м³:

$$V_{скр} = \frac{10^3 \cdot Q}{K_0 \cdot \Delta t}, \quad (3.5)$$

де K_0 - об'ємний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м³ · °С).

Для наближених розрахунків значення K_0 може бути визначено за емпіричною формулою, Вт/(м³ · °С):

$$K_0 = (17,4 + 115 \cdot m \cdot U_2) \cdot \rho_2 \cdot U_2, \quad (3.6)$$

де U_2 і ρ_2 - відповідно швидкість, м/с, і густина газу кг/м³, на виході з скрубера (у його верхній частині).

Швидкість газу на виході з скрубера U_2 не повинна перевищувати 1,0 ... 1,2 м/с, щоб уникнути винесення крапель рідини, що зрошує.

Значення K_0 , отримані при виробничих випробуваннях порожнистих скрубберів, що очищають доменний газ, знаходяться в межах 235 ... 580 Вт/(м³ · °С).

Діаметр скрубера, м:

$$D = \left(\frac{V_2}{0,785 U_2} \right)^{0.5}, \quad (3.7)$$

де V_2 - об'ємна витрата газу за робочих умов на виході з скрубера м³/с.

Для визначення значення V_2 необхідно знати об'ємну витрату сухого газу при нормальних умовах V_{oc} і вологість газу на виході з скрубера, м³:

$$V_2 = V_{oc} \cdot \left(1 + \frac{f_0}{0,804} \right) \cdot \frac{101325T}{273P}, \quad (3.8)$$

де V_{oc} - об'єм сухого газу при нормальних умовах, м³;

f_0 - абсолютна вологість газу, приведена до нормальних умов, кг/м³;

0,804 - густина водяної пари при нормальних умовах, кг/м³;

P - тиск, Па;

T - температура, К.

Вологість газу на виході з скрубера, приведена до нормальних умов, кг/м³:

$$f_{02} = f_{01} + \frac{\varphi M_{\hat{a}}}{V_0}, \quad (3.9)$$

де f_{01} - вологість газу на вході в скруббер, приведена до нормальних умов кг/м³.
Корисна (активна) висота скруббера, м:

$$H = \frac{V_{\tilde{n}\tilde{e}\tilde{o}}}{0,785D^2}. \quad (3.10)$$

Оптимальне відношення висоти скруббера до діаметру:

$$H/D=2,5. \quad (3.11)$$

При орієнтовних розрахунках ступеня уловлювання пилу в скруббері можна скористатися енергетичним методом, згідно з яким ефективність роботи мокрих пиловловлювачів визначається витратами енергії на процес очищення газу. При цьому враховується енергія, витрачена на рух газу через пиловловлювач і енергія, витрачена на подачу і розпилювання рідини (води), що зрошує. Затрати енергії на очищення газу від пилу (витрата енергії на обробку рідиною певного обсягу газу), кДж/1000 м³ газу:

$$K = \Delta p_{an} + p_{ж}m, \quad (3.12)$$

де Δp_{an} – гідравлічний опір апарату (скруббера), Па;

$p_{ж}$ - тиск рідини, що розпилюється в скруббері (води), Па;

m - питома витрата води, м³/м³ газу.

Значення m зазвичай знаходиться у межах 0,5 - 8 кг/м³ газу.

При великих концентраціях пилу на вході в скруббер (10...12 г/м³) m приймається близько 6 ... 8 кг/м³.

Ступінь вловлювання пилу в скруббері, частки:

$$\eta = 1 - \exp(-BK^x). \quad (3.13)$$

Тут B і x - константи, значення яких залежать від властивостей пилу, що вловлюється (табл. 3.2).

3.1.3 Приклад розрахунку порожнистого скруббера

Виконати розрахунок порожнистого скруббера, призначеного для охолодження і очищення доменного газу при наступних вихідних даних:

- об'ємна витрата сухих газів при нормальних умовах $V_{oc} = 65$ м³/с;
- надлишковий тиск газу в скруббері $P = 0,15$ МПа;
- початкова температура газу $t_0 = 250$ °С;

- вологість газу на вході в скруббер $f_0 = 50 \text{ г/м}^3$ при нормальних умовах;
- тиск води перед форсунками $p_{жс} = 0,4 \text{ МПа}$;
- початкова температура води $t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрата тиску в скруббері $\Delta p_{an} = 250 \text{ Па}$.
- об'ємна частка компонентів сухого доменного газу, %: $\text{CO}_2 - 11,3$; $\text{CO} - 29,0$; $\text{CH}_4 - 0,2$; $\text{H}_2 - 4,3$; $\text{N}_2 - 55,2$.

Таблиця 3.2 - Значення констант B і x для деяких видів пилу металургійного виробництва

Вид пилу	B	x
Колошниковий (доменний) пил	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
Пил вапняних печей	$6,5 \cdot 10^{-4}$	1,0529
Пил мартенівських печей, що працюють на дутті, збагаченому киснем	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
Пил мартенівських печей, що працюють на повітряному дутті	$1,74 \cdot 10^{-6}$	1,594
Конвертерний пил при продувці киснем зверху	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,4663
Пил, що утворюється при виплавці 45% феросиліцію в закритих електропечах	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,26
Пил, що утворюється при виплавці силікомарганцю в закритих печах	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,67

Обчислюють об'ємну витрату вологого доменного газу при нормальних умовах на вході в скруббер (формула (2.20)):

$$V_0 = V_{0c} \left(1 + \frac{f_0}{0,804} \right) = 65 \left(1 + \frac{0,05}{0,804} \right) = 69 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Визначають об'ємні частки компонентів вологого газу на вході в скруббер:

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{r_{\text{CO}_2(\text{сух})}}{1 + \frac{f_0}{0,804}} = \frac{11,3}{1 + \frac{0,05}{0,804}} = 10,64 \text{ } \%$$

Аналогічно об'ємна частка для $\text{CO} - 27,31\%$; $\text{CH}_4 - 0,19\%$; $\text{H}_2 - 4,05\%$; $\text{N}_2 - 51,98\%$.
Об'ємна частка водяної пари:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 100 - (10,64 + 27,31 + 0,19 + 4,05 + 51,98) = 5,83 \text{ } \%$$

За формулою для визначення суміші газів, Дж/м^3 і даними додатку В знаходять ентальпію газу на вході в скруббер ($t_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) (формула (2.16)):

$$i_1 = 0,01(458,25 \cdot 10,64 + 328,6 \cdot 27,31 + 456,3 \cdot 0,19 + 325,1 \cdot 4,05 + 325,95 \cdot 51,98 +$$

$$+383,55 \cdot 5,83) = 344,32 \text{ кДж/м}^3.$$

Приймаємо що на виході з скрубера газ має температуру мокрого термометра (див. табл. 3.1), тобто $t_2 = 56,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Ентальпія газу при цій температурі:

$$i_2 = 0,01(96,05 \cdot 10,64 + 73,56 \cdot 27,31 + 90,91 \cdot 0,19 + 73,0 \cdot 4,05 + 73,34 \cdot 51,98 + 85,15 \cdot 5,83) = 76,52 \text{ кДж/м}^3.$$

Кількість теплоти, що передається в скрубєрі від газу до води (формула 3.1):

$$Q = 69(344,32 - 76,52) = 18478,2 \text{ кВт}.$$

Приймаємо коефіцієнт випаровування води в скрубєрі $\varphi = 0,5$, кінцеву температуру води $t_k = 50^\circ\text{C}$ (зазвичай t_k приймається на $5 \dots 10^\circ\text{C}$ нижче температури мокрого термометра).

Середня температура газу в скрубєрі:

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{250 + 56,5}{2} \cong 153^\circ\text{C}.$$

Ентальпія насиченої пари при середній температурі газу в скрубєрі $i_n = 2747,1 \text{ кДж/кг}$ (додаток Д).

Ентальпія води при початковій температурі $t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $i_n = 83,9 \text{ кДж/кг}$, при кінцевій температурі ($50 \text{ }^\circ\text{C}$) $i_k = 167,51 \text{ кДж/кг}$.

Витрата води в скрубєрі (формула 3.3):

$$M_B = \frac{18478,2}{0,5(2747,1 - 83,9) + (1 - 0,5)(167,51 - 83,9)} = 13,45 \text{ кг/с}.$$

Об'єм витрат газу за робочих умов на вході в скрубєр (формула (3.8)):

$$V_1 = 69 \cdot \frac{101325 \cdot (237 + 250)}{237 \cdot (101325 + 150000)} = 53,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Питома витрата води на зрошення (формула (3.4)):

$$m = \frac{13,45}{53,3} = 0,252 \text{ кг/м}^3.$$

* Оскільки вологість газу на виході з скрубєра не відома, i_2 визначається для хімічного складу газу на вході апарату.

Вологість газу на виході з скрубера при нормальних умовах (формула (3.9)):

$$f_{02} = 50 + \frac{0,5 \cdot 13,45 \cdot 10^3}{69} = 147,5 \text{ кг/м}^3.$$

Необхідно перевірити чи можлива така вологість при температурі і тиску газу на виході з скрубера $t_2 = 56,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 251325 \text{ Па}$.

Максимально можлива абсолютна вологість газу за робочих умов на виході з скрубера:

$$f_H = \frac{16965}{463 \cdot 329,5} \cdot \frac{251325}{251325 - 16965} = 0,119 \text{ кг/м}^3,$$

де 16965 Па - парціальний тиск водяної пари при $t_2 = 56,5 \text{ }^\circ\text{C}$;

463 Дж/(кг·К) - газова постійна водяної пари;

329,5 К - температура газу на виході з скрубера;

251325 Па - абсолютний тиск газу.

Наведена до нормальних умов максимально можлива вологість газу на виході з скрубера (формула (2.24)):

$$f_{0H} = 0,119 \cdot \frac{101325 \cdot 329,5}{273 \cdot 251325} = 0,0579 \text{ кг/м}^3.$$

Отже, прийняте значення коефіцієнта випаровування води в скрубєрі $\varphi = 0,5$ і отримані значення витрати води M_e і питомої витрати води на зрошення m вимагають уточнення. Ці обчислення наведені далі.

Розрахунки показали, що газ на виході з скрубера насичений водяними парами (відносна вологість $\varphi = 1$) і містить максимально можливу їх кількість - 0,0579 кг/м газу при нормальних умовах.

Питома витрата газу за робочих умов на виході з скрубера (формула (2.23)):

$$V_2 = 65 \left(1 + \frac{0,0579}{0,804} \right) \frac{101325 \cdot 329,5}{251325 \cdot 273} = 33,9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Середня різниця температур між газом і водою в скрубєрі, (формула (3.2)):

$$\Delta t = \frac{(250 - 50) - (56,5 - 20)}{\ln \frac{250 - 50}{56,5 - 20}} = 96,18 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Густина сухого доменного газу при нормальних умовах (додаток Б) (формула (2.12)):

$$\rho_{oc} = 0,01 \cdot (1,963 \cdot 11,3 + 1,25 \cdot 29 + 0,717 \cdot 0,2 + 0,089 \cdot 4,3 + 1,251 \cdot 55,2) = 1,28 \text{ кг/м}^3.$$

Густина вологого газу за робочих умов на виході з скрубера (формула (2.22)):

$$\rho_2 = \frac{(1,28 + 0,0579)0,804}{0,804 + 0,0579} \cdot \frac{273 \cdot 251325}{101325 \cdot 329,5} = 2,56 \text{ кг/м}^3.$$

Наведені обчислення дозволили визначити режимні параметри скрубера, призначеного для роботи в якості контактної теплообмінника - охолоджувача доменного газу. При роботі скрубера в якості апарату мокрого очищення газу від пилу необхідна більш висока витрата води. Приймаємо $m = 1 \text{ кг/м}^3$.

Збільшення питомої витрати не може змінити температуру і вологість газу на виході з скрубера, так як ці величини мають гранично допустимі значення. Отже, зберігають свої значення V_2 і ρ_2 .

Об'ємний коефіцієнт теплопередачі (формула (3.6)):

$$\hat{E}_\delta = (17,4 + 115 \cdot 1,0 \cdot 1,2)2,56 \cdot 1,2 = 477,4 \text{ Вт/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Необхідний обсяг скрубера (формула (3.5)):

$$V_{\text{скр}} = \frac{10^3 \cdot 18478,2}{477,4 \cdot 96,18} = 402,44 \text{ м}^3.$$

Діаметр скрубера (формула (3.7)):

$$D = (33,9 / 0,785 \cdot 1,2)^{0,5} = 6 \text{ м}.$$

Корисна (активна) висота скрубера (формула (3.10)):

$$H = \frac{402,44}{0,785 \cdot 62} = 14,24 \text{ м}.$$

Відношення $\frac{H}{D} = \frac{14,24}{6} = 2,37$, що близько до рекомендованого значення 2,5.

Збільшення витрати води на скрублер $M'_B = mV_1 = 1,0 \cdot 53,3 = 53,3 \text{ кг/с}$ спричинить за собою зменшення коефіцієнта випаровування води в скрублері. Відповідно до формули (3.3):

$$\varphi = \frac{18478,2 - 53,3(167,51 - 83,9)}{53,3(2747,1 - 167,51)} = 0,102.$$

Ступінь вловлювання пилу в скрублері визначається енергетичним методом. Затрати енергії на очищення газу від пилу (формула (3.12)):

$$K = 250 + 400000 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} = 650 \text{ кДж/1000 м}^3 \text{ газу}.$$

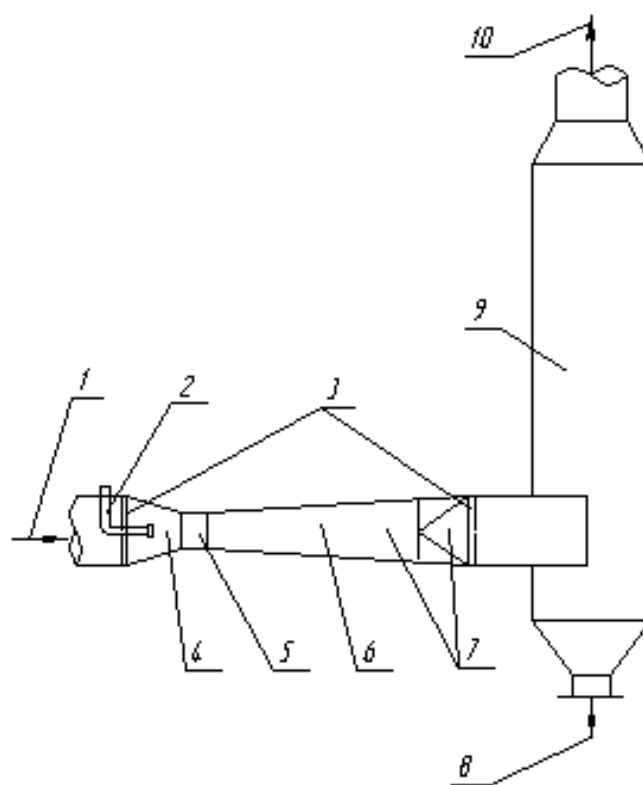
Для колошникового пилу константи $B = 6,61 \cdot 10^{-3}$, а $x = 0,891$ (див. табл. 3.2).
Ступінь вловлювання колошникового пилу в скрубєрі (формула (3.13)):

$$\eta = 1 - \exp(-6,61 \cdot 10^{-3} \cdot 650^{0,891}) = 0,88, \text{ тобто } \eta = 88\%.$$

3.2 Розрахунок скрубєра Вентурі

3.2.1 Пристрій і принцип дії скрубєра Вентурі

Скрубєри Вентурі - високоефективні пиловловлювачі, відомі так само, як швидкісні газопромивачі або труби Вентурі. Застосовують їх як для тонкого очищення промислових газів від мікронного і субмікронного пилу, так і для підготовки (кондиціонування) газів перед іншими пиловловлювальними апаратами, наприклад електрофільтрами. Скрубєр Вентурі (рис. 3.2) складається з труби-розпилювача і краплєвловлювача.



1 - запилений газовий потік, 2 - форсунка центральної подачі води, 3 - вхідний і вихідний патрубки труби Вентурі, 4 - конфузор, 5 - горловина, 6 - труба-розпилювач; 7 - дифузор, 8 - шлам, 9 - циклон-краплєвловлювач; 10 - очищений газ

Рисунок 3.2 - Схема скрубєра Вентурі

Газ, що очищається, надходить в конфузор труби-розпилювача, де проходить через завісу (факел) зрошувальної води. З-за високої швидкості газу вода дробиться

на дрібні краплі, а тиск в найбільш вузькій частині труби - горловині знижується. Все це сприяє кращому змочуванню частинок пилу і забезпечує вловлювання краплями часток розміром в десятки частки мікрометрів. В дифузорі швидкість газу зменшується і відбувається укрупнення (злиття) крапель води, що полегшує їх відділення в краплевловлювачі. У якості краплевловлювача зазвичай використовуються найпростіші газоочисні апарати інерційного типу.

Вибір краплевловлювача залежить від прийнятої швидкості газу в горловині труби-розпилювача. При помірних швидкостях у якості краплевловлювача може бути використаний скруббер ВС-ВТІ, при високих швидкостях - циклон ЦН-24 (ВС-ВТІ - відцентровий скруббер Всесоюзного теплотехнічного інституту, ЦН-24 - циклон НПОГАЗ).

Труба-розпилювач може мати круглий або прямокутний перетин. Можливість рівномірного розподілу зрошувальної рідини в круглій трубі знижується зі збільшенням її діаметру. Тому при продуктивності понад 40000 м³/год рекомендується застосовувати труби-розпилювачі прямокутної форми або встановлювати паралельно кілька труб-розпилювачів круглого перетину.

В останні роки виготовляють труби з регульованими горловинами, що забезпечує роботу на оптимальному режимі при змінній кількості газу, який надходить на очищення. Зрошувальна вода в трубу-розпилювач може подаватися центральним, периферійним і плівковим способами. Периферійне зрошення труби-розпилювача конструктивно простіше, але при цьому зростає гідравлічний опір. Плівкове зрошення рекомендується при очищенні газів від пилу, схильного до злипання. У ряді випадків поєднують два способи подачі зрошувальної рідини (наприклад, центральне і плівкове зрошення).

Ефективність роботи скрубера Вентурі визначається, головним чином, швидкістю газу в горловині труби і питомою витратою зрошувальної рідини. Доцільно підвищувати ступінь очищення газу, в основному, за рахунок збільшення швидкості, а не питомої витрати зрошувальної води. Зазвичай швидкість газу в горловині труби досягає 40...150 м/с, питома витрата зрошувальної води становить 0,5 ... 1,5 кг/м³ газу, що очищують.

3.2.2 Методика розрахунку скрубера Вентурі

При розрахунку скрубєрів Вентурі найбільш часто перевага віддається енергетичного методу, згідно з яким ефективність роботи мокрих пиловловлювачів визначається витратами енергії на процес очищення газу. Затрати енергії на очищення газу від пилу (енергія зіткнення), тобто витрата енергії на обробку рідиною певного обсягу газу, кДж/1000 м³ газу:

$$\Delta P_a = K - P_{ж} \cdot m, \quad (3.14)$$

де ΔP_{an} - гідравлічний опір апарату, Па;

$P_{ж}$ - тиск рідини, що розпилюється, на вході в апарат, Па;

m - питома витрата зрошувальної рідини, м³/м³ газу.

Ступінь вловлювання пилу, частки:

$$\eta = 1 - \exp(-BK^x). \quad (3.15)$$

де B і x - константи, значення яких залежать від властивостей вловлюваного пилу (табл. 3.2).

Необхідна ступінь вловлювання пилу визначається:

$$\eta = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1}, \quad (3.16)$$

де Z_1 і Z_2 - відповідно початкова та кінцева запиленість газу, г/м³.

В залежність (3.15) підставляється знайдене значення η (частки одиниці), значення констант B і x і обчислюється необхідна для отримання необхідного ступеня очищення газу питома витрата енергії K . Приймається питома витрата зрошувальної рідини m . В відповідності з виразом (3.14) визначається гідравлічний опір скрубера Вентурі, Па:

$$\Delta p_{\text{дв}} = K - p_{\text{в}} \cdot m. \quad (3.17)$$

Оцінюється гідравлічний опір краплєвловлювача Δp_k і обчислюється гідравлічний опір труби-розпилювача (труби Вентурі), Па:

$$\Delta p_{\text{од}} = \Delta p_{\text{дв}} - \Delta p_{\text{в}}. \quad (3.18)$$

Визначаються значення коефіцієнта гідравлічного опору сухої (без подачі зрошувальної рідини) труби Вентурі ξ_1 і коефіцієнта, що враховує додаткові втрати тиску, викликані подачею в трубу рідини, що зрошує, ξ_2 .

При оптимальній з аеродинамічної точки зору довжині горловини труби-розпилювача $l_2 = 0,15 d_2$ (d_2 - еквівалентний діаметр горловини) коефіцієнт опору ξ_1 приймається в межах 0,12 ... 0,15. Зазначені значення ξ_1 можуть бути поширені як на круглі труби, так і на труби з прямокутним перерізом горловини.

Коефіцієнт опору труби Вентурі, обумовлений введенням зрошувальної рідини:

$$\xi_2 = A \xi_1 m^{B_1}, \quad (3.19)$$

де A і B_1 - емпіричні коефіцієнти, значення яких наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Значення коефіцієнтів A і B_1

			Коефіцієнти
--	--	--	-------------

Спосіб зрошення труби - розпилювача (труби Вентурі)	Швидкість газу в горловині, м/с	Довжина горловини l_2 , м	A	B_1
Центральне і плівкове підведення зрошення	>80 <80	$(0,15-12,0)d_2$ $0,15d_2$	$1,68(l_2/d_2)^{0.29}$ $3,49(l_2/d_2)^{0.266}$	$1-1,12(l_2/d_2)^{-0.048}$ $1-0,98(l_2/d_2)^{0.02}$
Периферійне підведення в конффузор	>80 <80	$0,15d_2$ $0,15d_2$	13,4 1,4	0,024 -0,316
Центральне підведення зрошення в конффузор	40..150	$0,15d_2$	0,63	-0,3

Обчислюється швидкість газу в горловині труби - розпилювача, м/с:

$$U_2 = \left(\frac{2\Delta\rho_{TP}}{\xi_1\rho + \xi_2 m\rho_{\kappa}} \right)^{0.5}, \quad (3.20)$$

де ρ і ρ_{κ} - відповідно щільність газу, що очищають, і зрошувальної рідини, кг/м³.

Визначається діаметр горловини труби - розпилювача, м:

$$d_2 = 1.13 \left(\frac{V}{U_2} \right)^{0.5}, \quad (3.21)$$

де V - об'єм при робочих умовах газу, що очищають, м³/с.

Оптимальне з аеродинамічної точки зору наступне співвідношення розмірів труби - розпилювача: кут звуження конффузора $\alpha_1=25..28^\circ$, його довжина:

$$l_1 = \frac{d_1 - d_2}{2tg \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (3.22)$$

де d_1 - діаметр вхідного перетину конффузора; довжина горловини труби $l_2=0,15d_2$; кут розкриття дифузора $\alpha_2=6..7^\circ$, його довжина:

$$l_3 = \frac{d_3 - d_2}{2tg \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (3.23)$$

де d_3 - діаметр вихідного перерізу дифузора.

У разі необхідності за довідниками вибираються марка і технічні характеристики типових труб-розпилювачів, відповідних розрахунком. Наприклад, НІОГАЗ розробив типорозмірний ряд високонапірних скрубєрів Вентурі марки ГВПВ, що мають діаметри горловини d_2 : 115, 135, 155, 180, 200, 240, 280, 320, 370 і 420 мм.

3.2.3 Приклад розрахунку скрубєра Вентурі

Розрахувати скрубєр Вентурі для очищення газів, що відходять від мартенівської печі, яка працює на дутті, збагаченому киснем.

Визначити розміри, ефективність і гідравлічний опір.

Вихідні дані:

- витрата вологих газів при нормальних умовах $V_0 = 150000 \text{ м}^3/\text{год}$;
- температура газів $t = 200 \text{ }^\circ\text{C}$;
- розрідження перед газоочищенням $P_0 = 5 \text{ кПа}$;
- густина газу при нормальних умовах $\rho_1 = 1,29 \text{ кг/м}^3$;
- концентрація пилу в газі на вході в газоочисний апарат $Z_1 = 5 \text{ г/м}^3$;
- тиск води, що зрошує, $P_{\text{ж}} = 300 \text{ кПа}$;
- необхідна концентрація пилу в газі на виході з апарату $Z_2 = 100 \text{ мг/м}^3$.

За формулою (3.16) визначається необхідний ступінь очищення газу:

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

В інтервалі високих значень ступеня очищення газу (0,98 ... 0,99) його зміни відчутні мало і в даному випадку доцільно використовувати поняття числа одиниць переносу, аналогічне тому, що застосовується в технологічних процесах, пов'язаних з тепло-і масообміном.

Число одиниць переносу:

$$N = \ln \frac{1}{1 - \eta} = \ln \frac{1}{1 - 0,98} = 3,92.$$

Із зіставлень двох останніх виразів випливає, що:

$$N = BK^x.$$

У даному випадку:

$$3,92 = 1,565 \cdot 10^{-6} K^{1,619},$$

звідки $K = 8950 \text{ кДж/1000 м}^3 \text{ газу}$.

Загальний гідравлічний опір скрубера Вентурі (формула (3.17)):

$$\Delta p_{\text{ан}} = 8950 - 300000 \cdot 0,001 = 8650 \text{ Па.}$$

Тут питома витрата рідини m , що зрошує газ, прийнята $0,001 \text{ м}^3/\text{м}^3$ газу.
Густина газу на вході в скрубер Вентурі:

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{273(101,3 - P_1)}{(273 + t_1)101,3} = 1,29 \frac{273(101,3 - 5)}{(273 + 200)101,3} = 0,71 \text{ кг/м}^3.$$

Питома витрата газу, що надходить на очищення, за робочих умов:

$$V_1 = V_0 \frac{\rho_0}{\rho_1} = 150000 \frac{1,29}{0,71} = 273000 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата зрошувальної рідини (води):

$$M = m V_1 = 0.001 \cdot 273000 = 273 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Гідравлічний опір циклону - краплєвловлювача на підставі досвіду роботи аналогічних установок приймаємо:

$$\Delta P_k = 100 \text{ Па.}$$

Гідравлічний опір труби-розпилювача (труби Вентурі) визначаємо за формулою (3.18):

$$\Delta p_{\text{тр}} = 8650 - 100 = 8550 \text{ Па.}$$

Температура газів на виході зі скрубера Вентурі:

$$t_2 = (0,133 - 41m) t_1 + 35 = (0,133 - 41 \cdot 0,001) 200 + 35 = 53,4 \text{ }^\circ\text{C},$$

що добре узгоджується з досвідом роботи промислових установок ($50 \dots 55^\circ\text{C}$).

Густина газу на виході з труби Вентурі (без урахування зміни вологості газу):

$$\rho_2 = \rho_0 \frac{273 \cdot (101,3 - P_1 - \Delta P_{\text{тр}})}{(273 + t_2) \cdot 101,3} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 - 5 - 8,55)}{(273 + 53,4) \cdot 101,3} = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

В умовах розрахунку доцільно обрати трубу Вентурі (трубу-розпилювач) оптимальної форми з центральним підведенням зрошувальної рідини. У цьому випадку значення коефіцієнта гідравлічного опору сухої (не зрошувальної) труби $\xi_1 = 0,15$, а емпіричні коефіцієнти $A = 0,63$, $B_1 = -0,3$ (див. табл. 3.3).

Підставивши в (3.19) числові значення, одержимо:

$$\xi_2 = 0,63 \cdot 0,15 \cdot 0,001^{-0,3} = 0,75.$$

Швидкість газу в горловині труби - розпилювача (формула (3.20)):

$$U_2 = \left(\frac{2 \cdot 8550}{0,15 \cdot 0,93 + 0,75 \cdot 0,001 \cdot 1000} \right)^{0,5} = 139 \text{ м/с}.$$

Об'ємна витрата газу на виході з труби Вентурі:

$$V_2 = V_0 \frac{\rho_0}{\rho_2} = \frac{150000 \cdot 1,29}{3600 \cdot 0,93} = 57,8 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Діаметр горловини труби Вентурі (формула (3.21)):

$$d_2 = 1,13 \left(\frac{57,8}{139} \right)^{0,5} = 0,73 \text{ м}.$$

Отримане значення діаметра горловини значно перевищує найбільший діаметр горловини типорозмірного ряду високонапірних труб Вентурі (0,42 м), в зв'язку, з чим необхідно встановити декілька паралельно працюючих труб. Приймаємо число труб $n = 4$. У цьому випадку діаметр горловини кожної з 4-х ідентичних труб:

$$d_2 = 1,13 \left(\frac{V_2}{n U_2} \right)^{0,5} = 1,13 \left(\frac{57,8}{4 \cdot 139} \right)^{0,5} = 0,364 \text{ м}.$$

Приймаємо діаметр горловини труби Вентурі рівним 370мм, що відповідає марці труби ГВПВ-0,100-400.

Швидкість газу в горловині труби в цьому випадку:

$$U_2 = \frac{1,13^2 V_2}{n d_2^2} = \frac{1,13^2 \cdot 57,8}{4 \cdot 0,37^2} = 134,8 \text{ м/с}.$$

Приймаємо швидкість газу на вході в конфузори і на виході з дифузори труби Вентурі рівною 20 м/с. При цій швидкості діаметр вхідного перетину конфузори (3.21):

$$d_1 = 1,13 \left(\frac{273000}{3600 \cdot 4 \cdot 20} \right)^{0,5} = 1,1 \text{ м},$$

а діаметр вихідного перерізу дифузори:

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

З аеродинамічної точки зору оптимальними є кут звуження конфузора $\alpha_1 = 25 \dots 28^\circ$ і кут розкриття дифузора $\alpha_2 = 6 \dots 7^\circ$.

Довжину горловини приймають $l_2 = 0,15 d_2$.

$$l_2 = 0,15 d_2 = 0,15 \cdot 0,364 = 0,06 \text{ м.}$$

3.3 Розрахунок гравітаційного пиловловлювача

3.3.1 Пристрій і принцип дії гравітаційного пиловловлювача

Гравітаційні пиловловлювачі - апарати грубого очищення газу, розраховані на вловлювання частинок пилу більше 100 ... 150 мкм. Найбільше поширення з них отримав радіальний пиловловлювач (рис. 3.3). Він являє собою розташований вертикально циліндричний корпус, в який зверху по центральному газоходу надходить газ, що очищається.

При виході з центрального газоходу газ повертає вгору і піднімається по кільцевому простору до патрубку, що відводить газ. Вловлений пил збирається в бункері. Радіальні (гравітаційні) пиловловлювачі найбільш ефективно працюють при швидкості газу в них 0,6-1,0 м/с. Подальше зниження швидкості газу незначно збільшує ступінь вловлювання пилу, істотно підвищуючи габаритні розміри пристрою. Втрата тиску в радіальних пиловловлювачах зазвичай не перевищує 130 ... 150 Па.

3.3.2 Методика розрахунку гравітаційного пиловловлювача

Відділення пилу в радіальних пиловловлювачах розглянутої конструкції відбувається під дією сил тяжіння та інерції. Газ, що очищається, виходячи з центрального газоходу, здійснює поворот на 180° . При цьому найбільш великі частки пилу під дією сил інерції випадають в пиловий бункер. Врахувати у розрахунок вплив сил інерції складно, так як деякі фактори, які впливають на розрахунок (швидкість і кривизна траєкторій частинок пилу тощо) не піддаються точному визначенню. У зв'язку з цим розрахунок осадження частинок пилу в радіальних пиловловлювачах проводять по залежностях, що враховують вплив тільки сили тяжіння. При цьому приймається, що найменшими вловлюємими в пиловловлювачі частками пилу є частинки, швидкість витання яких дорівнює середній швидкості висхідного потоку газу в апараті, м/с:

$$U = \frac{4V}{\pi(D^2 - d^2)}, \quad (3.24)$$

де V - об'єм газу, що надходить на очищення, $\text{м}^3/\text{с}$;
 $\pi = 3,14$ - відношення довжини кола до діаметра;
 D - внутрішній діаметр корпусу пиловловлювача, м ;
 d - зовнішній діаметр центрального газоходу, м .

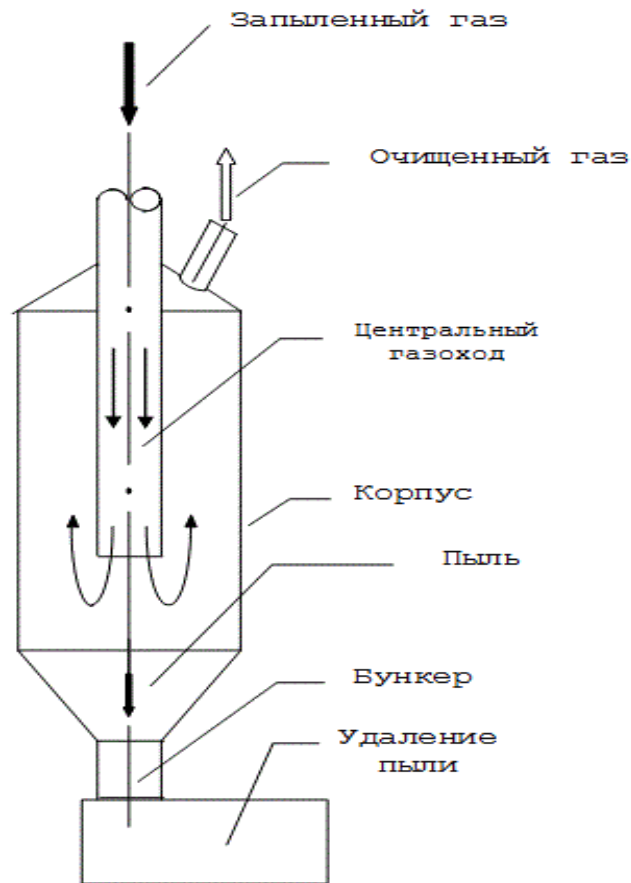


Рисунок 3.3 - Радіальний пиловловлювач

При сталому ізотермічному процесі осідання частинок пилу під дією сили тяжіння у висхідному потоці газу (як це має місце в радіальних пиловловлювачах) швидкість осідання частинок (швидкість витання) відносно газового потоку, що несе їх, $\text{м}/\text{с}$:

$$W = \left(\frac{g \cdot \rho_1 \cdot d_y^{n+1}}{0,75K \cdot A \cdot \rho \cdot v^n} \right)^{\frac{1}{2-n}}, \quad (3.25)$$

де g - прискорення сили тяжіння, $\text{м}/\text{с}^2$;
 ρ_1 - густина несферичних частинок пилу, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 d_y - еквівалентний діаметр несферичних частинок пилу, м ;
 A - коефіцієнт форми частинок пилу;
 A і n - коефіцієнти, значення яких наведені в табл.3.4;

ρ і ν - відповідно щільність і кінематичний коефіцієнт в'язкості газу, кг/м³.

Таблиця 3.4 - Значення коефіцієнтів A і n

Re	<0,1	0,1-1,0	1,0-10	10-100	100-800	100-1000
A	24	26,9	26,5	16,8	6,1	5,8
n	1,0	0,95	0,8	0,6	0,38	0,37

Коефіцієнти A і n є функцією числа Рейнольдса для частинки пилу:

$$Re = \frac{W \cdot d_y}{\nu} \quad (3.26)$$

Еквівалентний діаметр, що входить в цю залежність, частинок пилу є діаметр сфери, обсяг якої дорівнює обсягу аналізованої частки, м:

$$d_y = \left(\frac{6V_1}{\pi} \right)^{0,333}, \quad (3.27)$$

де V_1 - об'єм частинки пилу, м³.

Коефіцієнт форми частинок пилу - це відношення сили опору газового середовища руху даної (аналізованої) частки до опору середовища при русі сферичної частинки такого ж обсягу. Він обчислюється за формулою:

$$\frac{1}{K} = 0,843 \lg \frac{\varphi}{0,065}, \quad (3.28)$$

де φ - коефіцієнт сферичності (відношення поверхні сфери, що має той же обсяг, до поверхні даної частки).

Експериментальні значення коефіцієнта форми: для октаедра - 1,06; для куба - 1,07; для тетраедра - 1,18.

При відомих параметрах газу, що очищається, формули (3.24) - (3.28) дозволяють вирішити наступні завдання:

- визначити, які фракції пилу заданої щільності будуть осідати в пиловловлювачі заданих геометричних розмірів;
- встановити геометричні розміри пиловловлювача заданої конструкції, в якому будуть вловлювати частинки пилу заданих розмірів і щільності.

На металургійних заводах радіальні гравітаційні пиловловлювачі широко використовуються для сухого грубого очищення доменного газу.

3.3.3 Приклад розрахунку гравітаційного пиловловлювача

Розрахувати гравітаційний (радіальний) пиловловлювач, призначений для очищення доменного газу підвищеного тиску.

Вихідні дані:

- витрата газу - 400000 м³/год;
- температура - 2500°С;
- очищенню підлягає доменний газ при надлишковому тиску 0,25 МПа;
- для прийнятого складу газу за робочих умов $\rho = 1,57 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- густина і еквівалентний діаметр найменших уловлюваних частинок пилу $\rho_1 = 3500 \text{ кг/м}^3$, $d_p = 0,15 \text{ мм}$.

Оцінюють можливе значення числа Рейнольдса для частинки пилу. У радіальних пиловловлювачах рекомендується швидкість газу 0,6 ... 1,0 м/с. При такій швидкості витання часток пилу число Рейнольдса визначається за формулою (3.26):

$$Re = \frac{1,0 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}}{16,7 \cdot 10^{-6}} = 8,98.$$

Отримане значення числа Рейнольдса знаходиться в інтервалі значень 1-10, для якого згідно з таблицею 3.4 слід приймати $A = 26,5$ і $n = 0,8$.

З урахуванням коефіцієнтів швидкість витання часток визначається за формулою (3.25):

$$W = \left(\frac{9,81 \cdot 3500 \cdot (1,5 \cdot 10^{-4})^{1,8}}{0,75 \cdot 1,2 \cdot 26,5 \cdot 1,57 \cdot (16,7 \cdot 10^{-6})^{0,8}} \right)^{\frac{1}{2-0,8}} = 0,817 \text{ м/с}.$$

Обчислимо значення числа Рейнольдса при швидкості витання часток пилу $W = 0,817 \text{ м/с}$:

$$Re = \frac{0,817 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}}{16,7 \cdot 10^{-6}} = 7,34.$$

Отримане значення числа Рейнольдса відповідає прийнятим значенням коефіцієнтів A і n , що дозволяє закінчити обчислення швидкості витання.

Прийнявши середню швидкість газу в пиловловлювачі $U=W$, обчислимо необхідну площу перерізу пиловловлювача:

$$F = \frac{V}{U},$$

де V - об'єм газу за робочих умов (формула (2.4)):

$$V = 400000 \cdot \frac{101325 \cdot (273 + 250)}{273 \cdot 0,35 \cdot 10^6} - 221844 \text{ м}^3/\text{ч} = 61,62 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$F = \frac{61,62}{0,817} = 75,43 \text{ м}^2.$$

Використовуючи отримані значення U і V можна визначити діаметри пиловловлювача D і d по формулі (3.24). При цьому необхідно, щоб швидкість газу в центральному газоході приблизно в 10 разів перевищувала швидкість в корпусі пиловловлювача. Висота апарату зазвичай перевищує його діаметр в 1,5-2 рази. Приймаючи $D^2/d^2=10$, отримаємо що площа перерізу пиловідокремлювачі, m^2 :

$$F = \frac{\pi}{4}(10d^2 - d^2) = \frac{9\pi \cdot d^2}{4}.$$

Отже,

$$d = \sqrt{\left(\frac{4F}{9\pi}\right)} = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 75,43}{9 \cdot 3,14}\right)} = 3,27 \text{ м.}$$

$$D = (10d^2)^{0,5} = (10 \cdot 3,27^2)^{0,5} = 10,34 \text{ м.}$$

Висота циліндричної частини пиловловлювача:

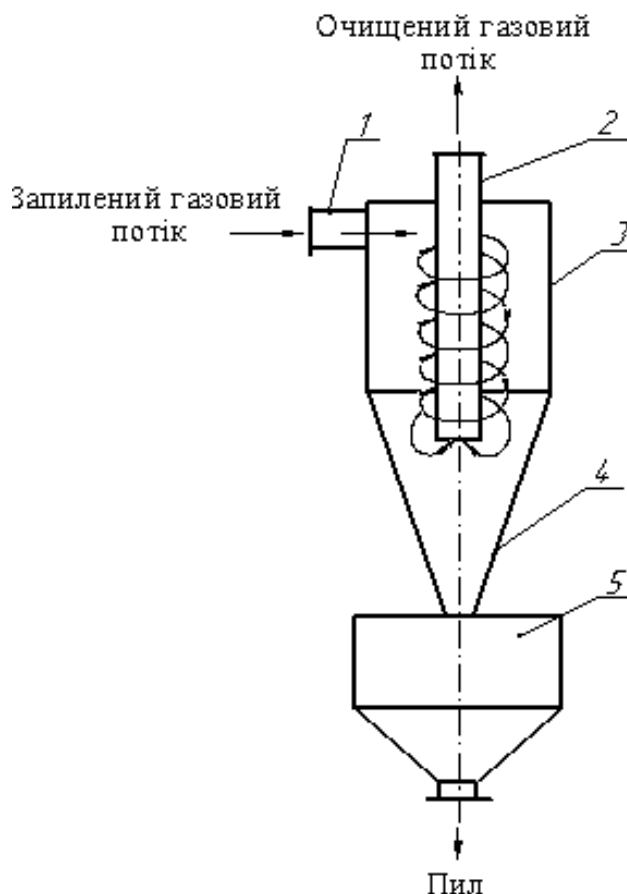
$$H = 2D = 2 \cdot 10,34 = 20,68 \text{ м.}$$

3.4 Розрахунок циклону

3.4.1 Пристрій і робота циклона

Циклон є одним з найбільш поширених пиловловлюючих апаратів. Уловлювання пилу в циклонах засноване на використанні відцентрових сил, що виникають при обертанні газового потоку всередині корпусу циклону. Це обертання досягається шляхом тангенціального введення газу в циклон. У найбільш досконалих конструкціях можна вловлювати частинки розміром 10мкм і більше. Принципова схема циклону показана на рис. 3.4.

Запилений газовий потік вводиться у верхню частину корпусу циклону 2 через патрубок 1. В циклоні газ рухається по спіралі вниз в кільцевому просторі між корпусом циклону і центральною вихлопною трубою 3, а потім робить поворот на 180° і виходить з циклону через розташовану по осі вихлопну трубу. Частинки пилу відкидаються інерційними (відцентровими) силами до стінок циклону і переміщуються вниз до герметизованого пилозбірника (бункера) 4.



- 1 - тангенціальний патрубок, 2 - патрубок для відводу очищеного газу, 3
 - циліндрична частина корпусу циклону, 4 - конічна частина корпусу циклону, 5
 - пилосбірний бункер

Рисунок 3.4 - Схема циклону

Ефективність циклону підвищується із збільшенням у ньому швидкості газу, крупності і щільності частинок пилю. З високою ефективністю циклони здатні вловлювати пил розміром 15-20 мкм і більше. При великих швидкостях зростання ступеня очищення газу в циклонах сповільнюється, а при перевищенні певного значення швидкості, що залежить від типу циклону і властивостей уловлюваного пилю, знижується. Це викликається відскоком частинок від стінок і відривом частинок, що вже осіли, турбулентними вихорами.

При виборі циклонів слід враховувати, що при конструктивних розрахунках потрібно вибирати тільки типи циклонів, що мають, за інших рівних умов найкращі показники в роботі і тому включені в уніфіковану серію. До таких циклонів відносяться всі циклони типу ЦН, циклони ВЦНПОТ і СІОТ.

Найбільшого поширення набули циклони НПОГАЗ. Існує три типи циклонів НПОГАЗ основної серії ЦН, що розрізняються між собою кутом нахилу вхідного патрубку до горизонту: ЦН-15, ЦН-11 і ЦН-24.

При однаковій ефективності найбільш високі показники роботи мають циклони ЦН-11. Циклони ЦН-15 відрізняються від них меншими габаритами, більш стійкою роботою на пилу, схильного до налипання. Циклони ЦН-24 звичайно

застосовуються при великих витратах газів і великій запиленості в якості першого ступеня очищення.

Для очищення газів від дрібного пилу (5-6 мкм) при підвищених вимогах до якості очищення слід застосовувати найбільш ефективні конічні циклони СДК-ЦН-33 і СК-ЦН-34. Ці циклони рекомендується застосовувати і при уловлюванні абразивного пилу, так як вони здатні забезпечувати високий ступінь очищення при порівняно невеликій швидкості газового потоку на вході в циклон.

Всі циклони НПОГАЗ нормалізовані, діаметри циклонів прийняті від 200 до 3000мм. Проте внаслідок зниження ефективності уловлювання пилу зі збільшенням діаметру застосовувати циклони з діаметром, що перевищує 1000мм, не рекомендується. У цьому випадку слід встановлювати групу циклонів НПОГАЗ, що працюють паралельно. Циклони типу ЦН об'єднуються в групи по 2, 4, 6, 8 циклонів, розташованих у два ряди, і по 10, 12, 14 елементів при груповому компонуванні. Діаметр циклонів типу ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, об'єднаних у групи з дворядним компонуванням, не повинен перевищувати 1,8м, а при круговому компонуванні 1,0м. Якщо потрібно провести очищення великих кількостей газів (більше 80000 м³/год) слід застосовувати батарейні циклони.

3.4.2 Методика розрахунку циклону

Циклони розраховують у наступному порядку. Задають тип циклону, визначають оптимальну швидкість газу в апараті w_o . Для циклонів ЦН-24 оптимальна швидкість дорівнює 4,5 м/с; ЦН-15, ЦН-11 - 3,5 м/с; СКД-ЦН-33 – 2м/с; СК-ЦН-34 - 1,7 м/с. Швидкість газу в циклоні не повинна відхилятися від оптимального значення більш ніж на 15%.

Необхідна площа перерізу циклонів, м²:

$$F = \frac{V_{\delta}}{w_o}, \quad (3.29)$$

де V_p -об'єм газу, що надходить на очищення, за робочих умов, м³/с;

w_o - оптимальна умовна швидкість газу в циклоні, м/с.

Виходячи з обсягу газу, що надходить на очищення, за конструктивних міркувань задаються числом циклонів N і визначають їх діаметр, м:

$$D = \sqrt{\frac{V_p}{w_o \cdot N \cdot 0,785}}. \quad (3.30)$$

Діаметр циклону округлюється до найближчого значення ряду, мм: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1250, 1400, 1600, 1800.

Дійсна швидкість газу в циклоні, м/с:

$$\omega = \frac{V_p}{0,785 \cdot D^2 \cdot N} \cdot \quad (3.31)$$

Як вже було зазначено, ω не повинна відхилятися від ω_0 більш ніж на 15%.

Втрата тиску в циклоні, Па:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho \quad (3.32)$$

де ξ - коефіцієнт гідравлічного опору циклону;

ρ - густина газу за робочих умов, кг/м³.

Коефіцієнт опору циклону ξ залежить від ряду факторів: діаметра циклону, концентрації пилу, компонування циклонів в групі, організації виходу газу з вихлопної труби і деяких інших і обчислюється за формулою:

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500} + K_3 \quad (3.33)$$

де ξ_{500} - коефіцієнт опору циклону діаметром 500мм, табл. 3.5;

k_1 - поправочний коефіцієнт на вплив діаметра циклону, табл. 3.6;

k_2 - поправочний коефіцієнт на вплив запиленості газу, табл. 3.7;

k_3 - поправочний коефіцієнт на вплив групового компонування циклонів, табл. 3.8.

Загальний і фракційний коефіцієнти очищення газу (ступінь вловлювання пилу) залежать від розміру вловлюваних частинок пилу d , умовної швидкості газу в циклоні ω , типу та діаметру циклону D , щільності частинок пилу ρ_1 і газу ρ і динамічного коефіцієнта в'язкості газу μ .

Таблиця 3.5 - Значення коефіцієнтів опору циклонів $D = 500$ мм

Тип циклону	$\frac{d}{D}$	Без додаткових пристроїв *		З розкручувачем		З кільцевим дифузоров		З вихідним равником
		ξ_{500}^c	$\xi_{500}^п$	ξ_{500}^c	$\xi_{500}^п$	ξ_{500}^c	$\xi_{500}^п$	ξ_{500}^c
ЦН-11	0,59	245	250	-	-	207	215	325
ЦН-15	-	155	163	115	121	132	140	158
ЦН-15У	-	165	170	118	152	140	148	158
ЦН-24	-	75	80	61	66	64	70	73
СДК-ЦН-33	0,33	520	600	-	-	-	-	500
СК-ЦН-34	0,34	1050	1150	-	-	-	-	-

* Індекс «с» означає, що циклон працює в гідравлічній мережі, а «п» - без мережі, тобто прямо на вихлоп в атмосферу.

Таблиця 3.6 - Поправочний коефіцієнт k_1 на вплив діаметра циклону

D , мм	Тип циклонів		
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У ЦН-24	СДК-ЦН-33 СК-ЦН-34
150	0,94	0,85	1,0
200	0,95	0,90	1,0
300	0,96	0,93	1,0
450	0,99	1,0	1,0
500 и більше	1,0	1,0	1,0

Таблиця 3.7 - Поправочний коефіцієнт k_2 на вплив запиленості газу

Тип циклону	k_2 при запиленості, г/м ³ (н)						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,85
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	0,91	0,91	0,90

Таблиця 3.8 - Поправочний коефіцієнт k_3 для груп циклонів ЦН

Характеристика групового циклону	k_3
Кругова компоновка, нижнє підведення газу	60
Прямокутна компоновка, циклони розташовані в одній площині. Відведення із загальної камери чистого газу	35
Те саме, але равликове відведення газу з циклонних елементів	28
Прямокутне компонування. Вільне підведення газу в загальну камеру	60
В разі одиночних циклонів	1

На підставі математичної обробки рівняння для імовірнісних функцій отримано вираз для визначення ступеня вловлювання пилу циклоном, %:

$$\eta = 100\hat{O}(x). \quad (3.34)$$

Значення x стосовно циклонів обчислюють за формулою:

$$x = \frac{\lg d_m / d_{50}}{(\lg^2 \sigma^T + \lg^2 \sigma_n)^{0,5}}, \quad (3.35)$$

де d_m - середньо медіанний розмір уловлюваних частинок пилу, мкм;

d_{50} - розмір часток, що вловлюються обраним циклоном при фактичних умовах роботи на 50%, мкм;

$\lg \sigma^T$ - величина, що характеризує дисперсію часток пилу, що вловлюються в умовному циклоні, табл. 3.9;

$\lg \sigma_n$ - середнє квадратичне відхилення функції розподілу вловлюваних частинок пилу;

$$\lg \sigma_n = \frac{\lg d_{84,1}}{d_m} = \frac{\lg d_m}{d_{15,9}}, \quad (3.36)$$

де $d_{84,1}$ і $d_{15,9}$ - розмір часток пилу, для яких маса всіх частинок, що мають розмір менше $d_{84,1}$ і $d_{15,9}$, становить відповідно 84,1 і 15,9% загальної маси пилу.

Розмір часток, що уловлюються обраним циклоном на 50%:

$$d_{50} = d_{50}^0 \cdot \left(\frac{D}{D_T} \cdot \frac{\rho_{1T}}{\rho_1} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{\omega_T}{\omega} \right)^{0,5}, \quad (3.37)$$

де d_{50}^T - розмір часток, що уловлюються обраним циклоном на 50%, табл. 3.9;

D, ρ_1, μ, ω – параметри, що відповідають фактичним умовам роботи циклону;

$D_T, \rho_{1T}, \mu_T, \omega_T$ – параметри, що відповідають умовам, прийнятим для умовного циклону: $D_T=600$ мм; $\rho_{1T}=1930$ кг/м³, $\mu_T=22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с, $\omega_T=3,5$ м/с.

Таблиця 3.9 - Параметри, що визначають ефективність циклонів

Параметри	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СКД-ЦН-33	СК-ЦН-34
d_{50}^T , мкм	8,5	6,0	4,5	3,65	2,31	1,95
$\lg \sigma^T$	0,3058	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308

Числове значення функції $\Phi(x)$ знаходять в залежності від величини x (формула (3.35)) по додатку Е.

Отримане значення ступеня вловлювання пилу в циклоні η (формула (3.34)) зіставляється з необхідним значенням ступеня вловлювання пилу, %:

$$\eta_T = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} \cdot 100. \quad (3.38)$$

де Z_1 і Z_2 - запиленість відповідно газу, що очищається, і очищеного в циклоні, г/м³.

Якщо виявиться, що $\eta < \eta_T$, то необхідно вибрати інший тип циклону з більшим значенням коефіцієнта гідравлічного опору або зменшити діаметр циклонів, збільшивши їх кількість.

3.4.3 Приклад розрахунку циклону

Вихідні дані:

- об'ємна витрата газу при нормальних умовах $V_i = 180000$ м³/год = 50 м³/с;

- температура газу $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- запиленість $Z = 4\text{ г/м}^3$;

Газовий склад, %: $\text{N}_2 - 79,9$; $\text{O}_2 - 12$; $\text{CO} - 0,1$; $\text{CO}_2 - 6$; $\text{H}_2\text{O} - 2$.

Дисперсний склад пилу:

Фракція, мкм	<5	5-10	10-20	20-30	30-40	>40
Вміст, %	7	13	27	11	22	20

Густина газу при нормальних умовах (формула (2.12)):

$$\rho_0 = 0,01 \cdot (1,251 \cdot 79,9 + 1,429 \cdot 12 + 1,250 \cdot 0,1 + 1,976 \cdot 6 + 0,804 \cdot 2) = 1,31\text{ кг/м}^3.$$

Густина газу за робочих умов, кг/м^3 :

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (P_{\text{ааа}} \pm P_{\text{о}})}{(273 + \text{О}_{\text{а}}) \cdot 101,3 \cdot 10^3},$$

де ρ_0 - густина газів при нормальних умовах, кг/м^3 ;

$P_{\text{ааа}}$ - нормальний атмосферний тиск, Па;

$P_{\text{о}}$ - розрідження газу, $P_{\text{о}} = 1\text{ кПа}$;

$\text{О}_{\text{а}}$ - температура газів.

$$\rho = 1,31 \cdot \frac{(101,3 - 1) \cdot 273}{(273 + 150) \cdot 101,3} = 0,84\text{ кг/м}^3.$$

Витрата газу за робочих умов, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_p = \frac{V_0 \cdot \rho_0}{\rho \cdot 3600},$$

$$V_p = \frac{180000 \cdot 1,31}{0,84 \cdot 3600} = 77,9\text{ м}^3/\text{с}.$$

Приймаємо груповий циклон НПОГАЗ типу ЦН-24. У цьому випадку оптимальна швидкість газу в циклоні $\omega_0 = 4,5\text{ м/с}$. Приймавши число циклонів $N = 24$, обчислюємо діаметр циклону (формула (3.30)):

$$D = \sqrt{\frac{77,9}{4,5 \cdot 24 \cdot 0,785}} = 0,96\text{ м}.$$

Приймаємо найближчий стандартний діаметр циклону 1 м і визначаємо справжню швидкість газу в циклоні (формула (3.31)):

$$\omega = \frac{77,9}{0,785 \cdot 1^2 \cdot 24} = 4,1 \text{ м/с.}$$

Відхилення від оптимальної швидкості:

$$\Delta = \frac{4,5 - 4,1}{4,5} \cdot 100 = 9 \%,$$

що знаходиться в допустимих межах.

Втрата тиску в циклоні (формула (3.32)):

$$\Delta p = 112,6 \cdot \frac{4,1^2}{2} \cdot 0,84 = 795 \text{ Па.}$$

Динамічна в'язкість газу за робочих умов (формула 2.5):

$$\mu_{CO} = 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273+100}{(273+150)+100} \cdot \sqrt{\left(\frac{273+150}{273}\right)^3} = 47,8 \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_{CO_2} = 13,7 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273+254}{(273+150)+254} \cdot \sqrt{\left(\frac{273+150}{273}\right)^3} = 34,49 \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_{O_2} = 20,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273+131}{(273+150)+131} \cdot \sqrt{\left(\frac{273+150}{273}\right)^3} = 56,33 \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_{N_2} = 17 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273+114}{(273+150)+114} \cdot \sqrt{\left(\frac{273+150}{273}\right)^3} = 48,1 \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$\mu_{H_2O} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273+961}{(273+150)+961} \cdot \sqrt{\left(\frac{273+150}{273}\right)^3} = 21,44 \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості суміші газів (формула (2.10)):

$$\mu = 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot (0,1 \cdot 47,8 + 6 \cdot 34,49 + 12 \cdot 56,33 + 79,9 \cdot 48,1 + 2 \cdot 21,44) = 47,74 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Розмір часток, що вловлюються обраним циклоном на 50% (формула (3.37)):

$$d_{50} = 8,5 \cdot \left(\frac{1,60}{0,60} \cdot \frac{1930}{4000} \cdot \frac{47,74 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{4,1} \right)^{0,5} = 13 \text{ мкм.}$$

При побудові графіка по дисперсному складу пилу у логарифмічно-імовірнісній сітці координат (ЛІСК) (на осі ординат відкладається відсоток по масі часток, на

осі абсцис – діаметр часток) визначаємо наступні значення: $d_m=22\text{мкм}$, $d_{84,1}=38\text{мкм}$, $\lg \sigma_n = 0,24$.

Значення x (формула (3.35)):

$$x = \frac{\lg \frac{22}{13}}{(0,308^2 + 0,24^2)^{0,5}} = 0,59.$$

Значення функції $\Phi(x)$, відповідне $x = 0,59$, дорівнює 0,722.

Ступінь вловлювання пилу циклоном (формула (3.34)):

$$\eta = 100 \cdot 0,722 = 72,2 \text{ \%}.$$

Для визначення ефективності очищення пилу по кожній групі дисперсного складу використовуємо формулу і результати заносимо в табл. 3.10:

$$x = \frac{\lg \frac{d_{\bar{n}\bar{\sigma}, \bar{\sigma}\bar{\sigma}}}{13}}{\sqrt{0,308^2 + 0,24^2}}.$$

$$\begin{aligned} x_{0-5} &= -1,75; & \Phi(x) &= 0,04. \\ x_{5-10} &= -0,61; & \Phi(x) &= 0,2709. \\ x_{10-20} &= 0,16; & \Phi(x) &= 0,5636. \\ x_{20-30} &= 0,73; & \Phi(x) &= 0,7673. \\ x_{30-40} &= 1,1; & \Phi(x) &= 0,8643. \\ x_{>40} &= 1,25; & \Phi(x) &= 0,8944. \end{aligned}$$

Таблиця 3.10 - Результати очищення газів в циклоні

Розмір часток фракції, мкм	<5	5–10	10–20	20–30	30–40	>40	Σ
Вміст пилу до апарату, %	7	13	27	11	22	20	
Вихідна маса фракцій, г/м ³	0,28	0,52	1,08	0,44	0,88	0,8	
Фракційний ступінь очищення	0,04	0,27	0,56	0,77	0,86	0,9	
Запиленість після апарату, г/м ³	0,27	0,38	0,59	0,1	0,12	0,08	1,54
Вміст пилу після апарату, %	17,53	24,68	38,31	6,49	7,79	5,2	100

Запиленість газу після циклону:

$$Z_2 = 0,27 + 0,38 + 0,59 + 0,1 + 0,12 + 0,08 = 1,54 \text{ г/м}^3.$$

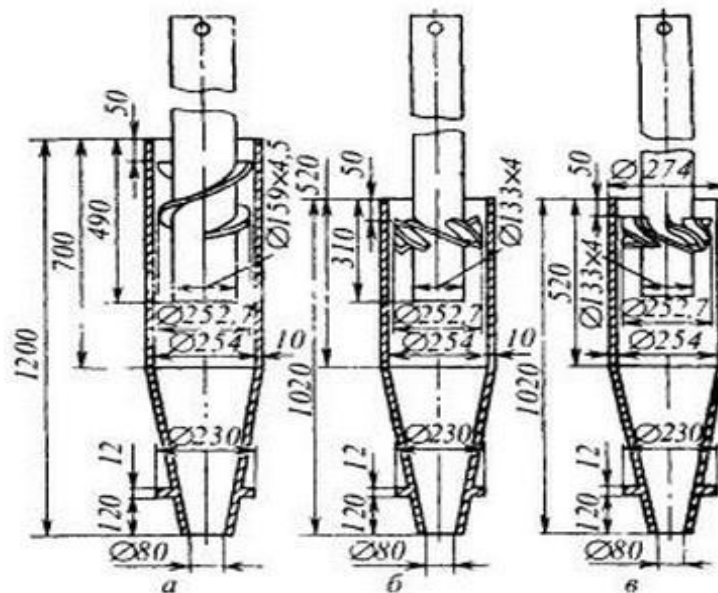
Приймаємо три групових циклони з восьми елементів марки ЦН-24 діаметром 1м.

3.5 Розрахунок батарейного циклону

3.5.1 Пристрій і принцип дії батарейного циклону

Батарейні циклони доцільно застосовувати при кількості газу, який надходить на очищення, що перевищує 50000 м³/год. Це апарати сухого напівтонкого очищення газу, розраховані на вловлювання частинок пилу більше 20 мкм. Вони складаються з сотень циклонних елементів, об'єднаних в загальному корпусі і мають загальні підведення і відведення газу.

На відміну від звичайних циклонів обертання газу в елементах батарейних циклонів досягається за допомогою направляючих апаратів. Через це розміри батарейного циклону в плані менше, ніж групи звичайних циклонів тієї ж продуктивності. На рис. 3.5 зображені найбільш поширені конструкції циклонних елементів, що складаються з корпусу, направляючого апарату і вихлопної труби. Найбільш поширені циклонні елементи діаметром 100, 150 і 250мм. Направляючий апарат типу «Гвинт» менш схильний до забивання золою або пилом, чинить менший гідравлічний опір, але забезпечує меншу ступінь очищення газу, ніж апарат типу «Розетка».

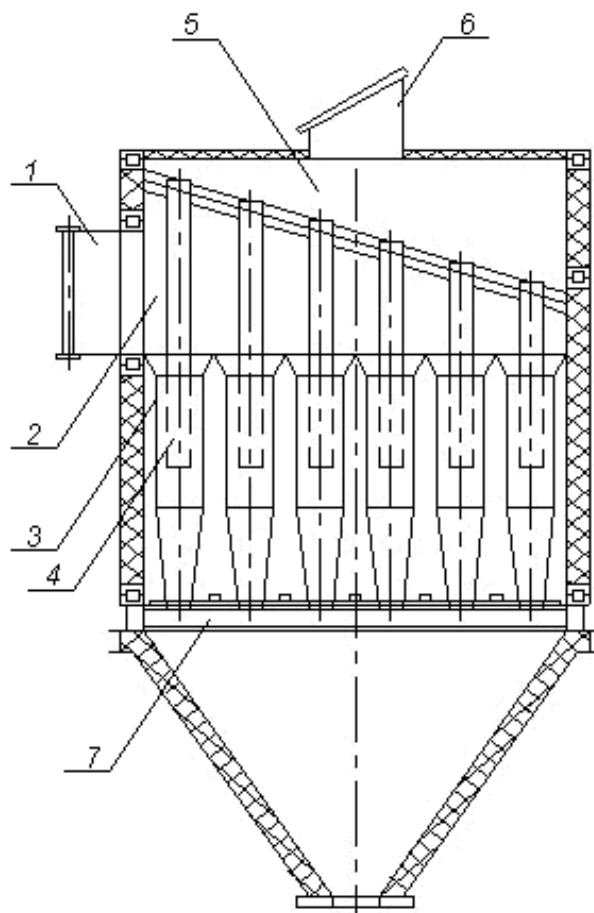


а - з направляючим апаратом типу «гвинт»; б - з направляючим апаратом типу «розетка»; в - з направляючим апаратом типу «розетка» з безударним входом

Рисунок 3.5 - Елементи батарейного циклону

Загальний вид батарейного циклону зображений на рис. 3.6. Гази, що очищаються, по вхідному патрубку 1 надходять в загальну розподільну камеру 2 і розподіляються за окремими циклонними елементами 3. В апаратах, що направляють, елементів газу, обертаячись звільняються від пилу. Очищені газу піднімаються по вихлопним трубах 4 в камеру чистого газу 5 і по вихідному патрубку 6 виводяться з апарату. Вловлений пил збирається в загальному бункері 7.

Число циклонних елементів в одному ряду по ходу газу, об'єднаних загальним пиловим бункером, не повинно перевищувати 10, а у ряді, перпендикулярному до потоку газу - 16. Однак в останньому випадку, починаючи з 12 елементів в ряду, пиловий бункер необхідно розділити перегородкою на дві частини.



1 - вхідний патрубок, 2 - розподільна камера; 3 - циклонні елементи, 4 - вихлопна труба, 5 - камера чистого газу; 6 - вихідний патрубок; 7 - бункер для пилу

Рисунок 3.6 - Схема батарейного циклону

Перевага батарейних циклонів перед звичайними полягає в наступному:

- батарейні циклони можуть очищати великі кількості газу, що неможливо при встановленні групи одиночних циклонів;

- при однакових витратах газу, що надходить на очищення, батарейний циклон значно компактніший ніж група одиночних циклонів.

Основні недоліки батарейних циклонів:

- підвищена металоємність, складає 200 ... 500 кг металу на очищення 1000м³/год газу, що майже вдвічі більше, ніж при використанні одиночних циклонів;
- менша надійність в експлуатації через можливість нерівномірного розподілу газу між циклонними елементами і підсосу газу через загальний бункер;
- залипання направляючих апаратів при запиленості газу, що очищається, більш 100 г/м³.

3.5.2 Методика розрахунку батарейного циклону

Розрахунок батарейних циклонів аналогічний розрахунку групи одиночних циклонів. Залежно від властивостей вловлюваного пилу вибирається тип направляючого апарату циклонних елементів. При пилу, схильного до злипання, застосовують направляючі апарати типу «гвинт». Вони менш схильні до забивання пилом, мають менший коефіцієнт гідравлічного опору, але й меншу ступінь вловлювання пилу, ніж апарати типу «розетка». При пилу, що слабо злипається, більш доцільно застосовувати направляючі апарати типу «розетка». Діаметр циклонних елементів приймають залежно від запиленості газу, що надходить на очищення.

Допустима запиленість, г/м³, при направляючому апараті:

типу «гвинт»	25	50	100
типу «розетка»	15	35	75
діаметр циклонного елемента, мм	100	150	250

Втрата тиску в батарейному циклоні, Па:

$$\Delta p = \xi \frac{w^2}{2} \rho, \quad (3.39)$$

де ξ - коефіцієнт гідравлічного опору циклонного елемента;

w - умовна швидкість газу в циклоном елементі, м/с;

ρ - щільність газу за робочих умов, кг/м³.

Для направляючих апаратів типу «гвинт» $\xi = 65$, для апаратів типу «розетка» з вісьмома лопатками, нахиленими під кутом $\alpha = 25$ і 30° , ξ відповідно дорівнює 90 і 65.

Умовна швидкість газу, м/с:

$$w = \frac{4V_1}{\pi D^2}, \quad (3.40)$$

де V_1 - витрата газу через один циклонний елемент за робочих умов, м³/с;

D - діаметр циклонного елемента, м.

Для батарейних циклонів при $\xi = 85 \dots 90$ оптимальне значення умовної швидкості $w_0 = 3,85$ м/с, при $\xi = 65$ оптимальне значення $w_0 = 4,5$ м/с. Значення умовної швидкості газу за робочих умов не повинно відхилятися від оптимального більше, ніж на $\pm 15\%$.

Витрата газу через один циклонний елемент, м³/с:

$$V_1 = w_0 \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.41)$$

Необхідна кількість циклонних елементів:

$$N = \frac{V}{V_1}, \quad (3.42)$$

де V - об'єм газу, що надходить на очищення, за робочих умов, м³/с.

Ступінь вловлювання пилу в елементі батарейного циклону визначають по залежностях (3.34) - (3.36). Необхідні для цих розрахунків значення параметрів d_{50}^T і $\lg \sigma^T$ наведені в табл. 3.11.

Таблиця 3.11 - Параметри, що визначають ступінь вловлювання пилу елементами батарейних циклонів

Елемент			d_{50}^T , мкм	$\lg \sigma^T$
Тип направляючого апарату	Кут нахилу α , град	Діаметр D , мм		
Гвинт	25	250	4,5	0,46
Розетка	25	250	3,85	0,46
"	30	250	5,0	0,46
"	25	150	3,38	0,46
"	25	100	3,0	0,46

Розмір часток, що вловлюються елементами батарейного циклону при фактичних умовах роботи на 50%, мкм:

$$d_{50} = d_{50}^T \left(\frac{\rho_{1T}}{\rho_1} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{w_T}{w} \right)^{0,5}, \quad (3.43)$$

де d_{50}^T - розмір частинок, що вловлюються умовним елементом на 50% (див. табл. 3.11);

ρ_1, μ, w - параметри, що відповідають фактичним умовам роботи;

ρ_{1T}, μ_T, w_T - параметри, що відповідають умовам, прийнятими для умовного елемента батарейного циклону: $\rho_{1T}=2200$ кг/м³; $\mu_T=23,7 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $w_T=4,5$ м/с.

Отримане значення d_{50} використовується при обчисленні x (формула (3.35)), що дозволяє визначити за додатком Е значення відповідної функції $\Phi(x)$. Обчислена за формулою (3.34) ступінь вловлювання пилу елементом батарейного циклону зіставляється з необхідним значенням (формула (3.38)). У разі необхідності ступінь вловлювання пилу може бути збільшена зменшенням діаметра елемента батарейного циклону або вибором більш ефективного типу направляючого апарату.

Ступінь вловлювання пилу батарейним циклоном зазвичай нижче, ніж його окремих елементів. Це викликано перетоком газу, що очищається, між елементами циклону, викликаним різницею у значеннях їх гідравлічних опорів.

3.5.3 Приклад розрахунку батарейного циклону

Вихідні дані:

- об'ємна витрата газу при нормальних умовах $V_i = 110000 \text{ м}^3/\text{год} = 50 \text{ м}^3/\text{с}$;
- температура газу $t = 180 \text{ }^\circ\text{C}$;
- запиленість $Z = 4 \text{ г/м}^3$;

Газовий склад, %: $\text{N}_2 - 70,7$; $\text{O}_2 - 12$; $\text{CO} - 0,3$; $\text{CO}_2 - 11$; $\text{H}_2\text{O} - 6$.

Дисперсний склад пилу:

Фракція, мкм	<1	1-5	>5
Вміст, %	8	59	33

Визначаємо щільність газової суміші при нормальних умовах: $\rho_0 = 1,325 \text{ кг/м}^3$.

Щільність газу за робочих умов, кг/м^3 :

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (P_{\text{атм}} \pm P_{\text{г}})}{(273 + \dot{O}_{\text{г}}) \cdot 101,3 \cdot 10^3},$$

де ρ_0 - густина газів при нормальних умовах, кг/м^3 ;

$P_{\text{атм}}$ - нормальний атмосферний тиск, Па;

$P_{\text{г}}$ - розрідження газу, = 1 кПа;

$\dot{O}_{\text{г}}$ - температура газів.

$$\rho = 1,325 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 - 1,5)}{(273 + 180) \cdot 101,3} = 0,79 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата газів за робочих умов:

$$V_{\text{г}} = \frac{V_0 \cdot \rho_0}{\rho \cdot 3600} = \frac{110000 \cdot 1,325}{0,79 \cdot 3600} = 51,2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

де V_0 - об'ємна витрата газів при нормальних умовах, м³/год.

Приймаємо тип циклону «розетка», з циклонним елементом найбільшого діаметра $D_{\text{ц}} = 250 \text{ мм}$ з $\alpha = 30^\circ$, оптимальна швидкість в циклонному елементі $W_{\text{опт}} = 4,25 \text{ м/с}$, а витрата через один циклонний елемент:

$$V_1 = W_{\text{опт}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{ц}}^2}{4} = 4,25 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 0,21 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Знаходимо необхідну кількість циклонних елементів:

$$N = \frac{V_p}{V_1} = \frac{51,2}{0,21} = 243,8 \text{ шт.}$$

Приймаємо 244 циклонних елементів, тобто компоновку з чотирьох груп по 61 циклонних елемента. У цьому випадку умовна швидкість газу в циклонних елементах:

$$W_{\text{д}} = \frac{V}{0,785 \cdot D_{\text{ц}}^2 \cdot N} = \frac{51,2}{0,785 \cdot 0,25^2 \cdot 244} = 4,28 \text{ м/с}.$$

Гідрравлічний опір батарейного циклону:

$$\Delta P_{\text{д}} = 65 \cdot \frac{4,28^2 \cdot 0,79}{2} = 470 \text{ Па}.$$

Розмір частинок, що вловлюються в батарейних циклонах за робочих умов з ефективністю 50%: $d_{50}^T = 3,85 \text{ мкм}$; $D_T = 0,6 \text{ м}$; $\mu_{\text{д}} = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\rho_{\text{д}} = 1930 \text{ кг/м}^3$; $w_T = 3,5 \text{ м/с}$; $\rho_{\text{г}} = 2960 \text{ кг/м}^3$.

Динамічна в'язкість окремих компонентів, що входять до складу газів, за робочих умов:

$$\mu_{\text{O}_2} = 20,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273+131}{(273+180)+131} \left(\frac{273+180}{273} \right)^{1,5} = 14,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

$$\mu_{\text{H}_2} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}; \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}; \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 6,95 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Молярна маса газової суміші:

$$M = 0,01 \cdot (70,7 \cdot 28,02 + 12 \cdot 32 + 0,3 \cdot 28,01 + 11 \cdot 44,01 + 6 \cdot 18,02) = 29,7 \text{ кг/моль}.$$

Динамічну в'язкість газової суміші визначаємо з виразу:

$$\frac{\dot{I}}{\mu} = \sum \frac{a_i \cdot M_i}{\mu_i} = 0,01 \cdot \left(\frac{70,7 \cdot 28,02}{11,8 \cdot 10^{-6}} + \frac{12 \cdot 32}{14,1 \cdot 10^{-6}} + \frac{0,3 \cdot 28,01}{11,5 \cdot 10^{-6}} + \frac{11 \cdot 44,01}{9,5 \cdot 10^{-6}} + \frac{6 \cdot 18,02}{6,95 \cdot 10^{-6}} \right) = 2,62 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu = M / 2,62 \cdot 10^6 = 29,7 / 2,62 \cdot 10^6 = 11,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$d_{50} = 3,85 \sqrt{\frac{0,25 \cdot 2200 \cdot 11,3 \cdot 10^{-6} \cdot 4,5}{0,25 \cdot 4000 \cdot 23,7 \cdot 10^{-6} \cdot 4,28}} = 2,02 \text{ мкм}.$$

Параметр x :

$$x = \frac{\lg d_m / d_{50}}{\sqrt{\lg^2 \delta_n + \lg^2 \delta_{\div}}},$$

$$\delta_n = 0,46.$$

При побудові графіка по дисперсному складу пилу в ЛІСК визначаємо наступні значення: $d_m = 4,7 \text{ мкм}$; $d_{84,1} = 13 \text{ мкм}$.

$$\delta_{\div} = \frac{d_{84,1}}{d_1} = \frac{13}{4,7} = 2,8.$$

$$\lg \delta_{\div} = \lg 2,8 = 0,45.$$

Для визначення ефективності очищення пилу по кожній групі дисперсного складу використовуємо формулу і результати заносимо в табл. 3.12:

$$x = \frac{\lg d_{\text{н.д.д.}} / 2,02}{\sqrt{0,352^2 + 0,45^2}}.$$

$$x_1 = -1,17; \Phi(x) = 0,1210.$$

$$x_2 = -0,15; \Phi(x) = 0,44045.$$

$$x_3 = 0,15; \Phi(x) = 0,5597.$$

Запиленість газу після батарейного циклону:

$$Z_2 = 0,28 + 1,32 + 0,59 = 2,19 \text{ г/м}^3.$$

Таблиця 3.12 - Результати очищення газів в батарейному циклоні

Розмір частинок фракції, мкм	<1	1-5	>5
------------------------------	----	-----	----

Вміст пилу до апарату, %	8	59	33
Вихідна маса фракцій, г/м ³	0,32	2,36	1,32
Фракційна ступінь очищення, %	12,1	44,04	55,97
Запиленість після апарату Z ₂ , г/м ³	0,28	1,32	0,59
Вміст пилу після апарату, %	12,8	60,3	26,9

Приймаємо 2 шт. ПЦБ-50:

- продуктивність: 50000-60000 м³/год;
- розміри: L=4630 мм; B=3130 мм; H=6550 мм;
- сумарна частина циліндричної частини 3,845 м².

3.6 Розрахунок тканинного (рукавного) фільтра

3.6.1 Пристрій і принцип дії тканинного (рукавного) фільтра

Процес фільтрації в рукавному фільтрі здійснюється в декілька стадій. У початковій стадії відбувається осадження частинок пилу на чистих волокнах усередині пористої перегородки фільтрувального матеріалу. В процесі проходження запиленого газового потоку через чистий фільтрувальний матеріал пил осідає на волокнах в результаті безпосереднього торкання, дії інерційних сил, броунівської дифузії і в меншій мірі – електричних сил тяжіння порошинок до волокон і сили гравітації. Пилові нарости, що осідають на волокнах, поступово зникаються і утворюють суцільну пористу пилову перегородку. Потім відбувається осадження аерозолів на пиловій підкладці до виникнення пилового шару завтовшки, відповідно певному гідравлічному опору.

Накопичуючись на поверхні тканини у вигляді шару, пил сам стає фільтруючим середовищем і збільшує ефективність пиловловлювання фільтру.

Процес видалення частини пилового шару зовні і зсередини фільтрувальної перегородки в тканинних фільтрах прийнято називати *регенерацією*, тобто частковим відновленням первинних властивостей фільтрувальної перегородки.

Одним з найбільш ефективних способів регенерації фільтрувального матеріалу, який широко поширений, є імпульсне продування з використанням швидкодіючих продувних клапанів. Фільтри з імпульсним продуванням типу ФРКИ, ФРКДІ, ФРІ, ФКІ, ФРІР, ФРІА знайшли застосування майже у всіх галузях промисловості.

Регенерація рукавів імпульсним продуванням здійснюється шляхом подачі імпульсів стислого повітря всередину рукава, при цьому тиск стислого повітря на вході в рукавний фільтр до 0,5 МПа (5 кгс/см²), а в накопичувачах стислого повітря в межах 0,3 – 0,5 МПа.

Швидкість фільтрування в рукавних фільтрах з імпульсним продуванням за інших рівних умов на 20 ... 30% вище, ніж у фільтрах з механічною регенерацією і зворотним продуванням, завдяки ефективнішою регенерацією за допомогою дуже коротких імпульсів. При ефективній регенерації загальний термін служби рукавів в цих фільтрах вищий, рукави менше зношуються, і до їх заміни залишкова запиленість зберігається на рівні 15 ... 50 мг/м³, і лише в окремих випадках ці значення перевищуються.

Достоїнствами фільтрів з імпульсним продуванням є, перш за все, економічність в роботі, відносно малі габарити, простота конструктивного оформлення, надійність в роботі. До основних недоліків слід віднести: підвищені вимоги до монтажних робіт, із-за необхідності ретельної центрівки регенеруючих сопел з віссю рукавів; необхідність наявності додаткового простору над фільтром для виїмки каркасів; необхідність наявності стислого повітря тиском до 5 атм. Проте, в загальній оцінці, ці фільтри в порівнянні з іншими конструкціями мають явні переваги.

Рукавні фільтри типу ФРІР призначені для очищення технологічних газів від дрібнодисперсного пилу, котрий не є пожаро- і вибухонебезпечним.

Рукавні фільтри типу ФРІР мають наступні переваги перед іншими що серійно випускаються:

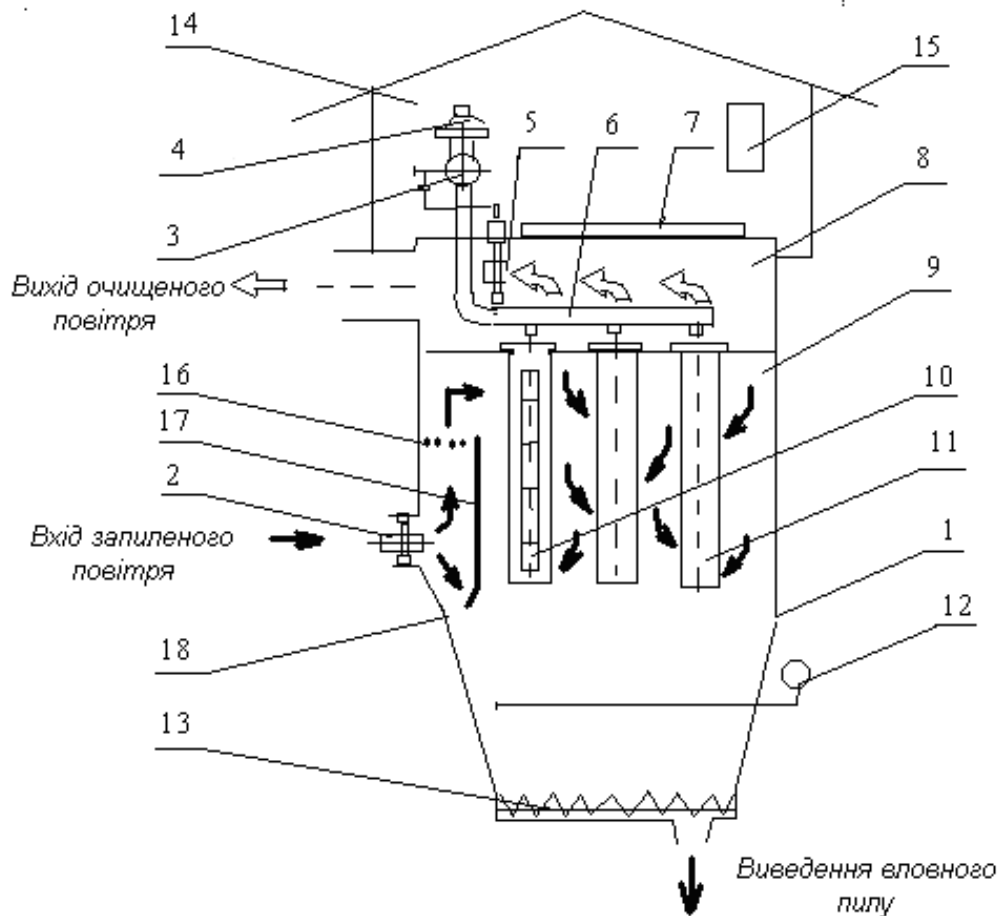
- менші габарити при тій же продуктивності;
- закріплення рукавів проводиться з одного боку у верхній частині фільтру, що гранично спрощує заміну рукавів;
- підвищена ремонтпридатність фільтру;
- ефективність імпульсної регенерації, здійснюваної за допомогою клапанів з підвищеною швидкістю;
- розміщення на відкритому повітрі з укриттям тільки верхньої частини фільтру.

Фільтр складається з корпусу і механічного устаткування. Корпус є несучою конструкцією і складається з опорного поясу з підвісними бункерами, вузла вивантаження пилу, системи пневмообрушення пилу, оглядових люків, відсічних клапанів забрудненого газу, розподільного газоходу і панелей огорожі. Перекриттям корпусу фільтру служить блок регенерації. Корпус розділений на камери чистого і брудного газу горизонтальними перегородками – рукавними дошками з отворами для кріплення фільтрувальних рукавів.

До складу механічного устаткування фільтру входять: система регенерації рукавів (накопичувачі стислого повітря, продувні клапани і роздаточні колектори), рукавні дошки, фільтрувальні рукави, дротяні каркаси, відсічні клапани, вузол редукування стислого повітря, пристрої пиловидалення і шафа управління регенерацією фільтру. Основні конструктивні особливості фільтру представлені на рис. 3.6.

3.6.2 Методика розрахунку тканинного (рукавного) фільтру

Ступінь вловлювання пилу в тканинних фільтрах достатньо велика. Запиленість очищених у тканинних фільтрах газів зазвичай не перевищує 50мг/м^3 . У зв'язку з цим основним фактором, що визначає необхідну площу фільтрувальної тканини в апараті, є перепад (втрата) тиску на тканині, що залежить від швидкості фільтрування (питомого навантаження на фільтрувальну тканину), частоти регенерації і ряду інших чинників.



1 - корпус фільтра; 2, 5 - відсічений клапан; 3 - накопичувач стисненого повітря; 4 - продувний клапан; 6 - розподільчий колектор; 7 - кришка; 8 - камера чистого газу; 9 - камера запиленого газу; 10 - каркас рукава; 11 - фільтрувальний рукав; 12 - система пневмообрушення; 13 - вузол вивантаження пилу; 14 - шатер фільтру; 15 - пристрій управління регенерацією; 16 - аеродинамічна решітка; 17 - відбійний щит; 18 - бункер

Рисунок 3.6 – Схема рукавного фільтра з імпульсною регенерацією

Допустиме навантаження на фільтрувальну тканину приймають на підставі досвіду експлуатації в залежності від застосовуваної тканини, методу регенерації і властивостей пилу. Найбільше значення мають вид (властивості) пилу і метод регенерації (табл. 3.13).

У фільтрі, що складається з N секцій, площа фільтрувальної поверхні однієї секції, m^2 :

$$S_1 = \frac{V_1}{w(N - N_1) - N_1 w_p}, \quad (3.44)$$

де V_1 - обсяг за робочих умов газу, що надходить на очищення, m^3/c ;
 w - швидкість фільтрування, m/c ;

N_1 - число секцій фільтра, що одночасно знаходяться в режимі регенерації; w_p - швидкість газу в процесі регенерації зворотною продувкою, м/с.

Таблиця 3.13 - Рекомендовані швидкості фільтрування в рукавних фільтрах, м/с

Клас пилу	Вид пилу	Регенерація фільтра		
		струшуванням і продувкою	імпульсною продувкою	зворотною продувкою
1	Сажа, кремнезем (біла сажа), возгони свинцю, цинку, активоване вугілля, цемент	0,0075...0,01	0,0133...0,0333	0,0055...0,0075
2	Возгони заліза, феросплавів, ливарний пил, вапно, глинозем	0,01...0,0125	0,025...0,00417	0,0075...0,00917
3	Кам'яне вугілля, вапняк, рудний пил, фрита емалей	0,00117...0,0133	0,0333...0,0583	0,01...0,015
4	Азбест, волокнистий пил, солі, пил шліфувальних процесів	0,0133...0,0258	0,0417...0,075	-
5	Тютюн, деревний пил, грубі рослинні волокна (пенька, джут та ін)	0,015...0,0333	0,0417...0,1	-

Загальна площа фільтрувальної поверхні фільтра, м²:

$$S=N \cdot S_1 \quad (3.45)$$

Зазвичай питоме навантаження на фільтрувальну тканину в процесі регенерації зворотною продувкою в 1,5-2 рази перевищує навантаження при фільтруванні, тобто $w_p/w=1,5...2,0$.

Щоб уникнути інтенсивного очищення для синтетичних і скляних тканин цей показник застосовується дещо меншим. При регенерації фільтра струшуванням або імпульсною продувкою у формулі (3.44) $w=0$. Витрата газу на імпульсну продувку, як уже зазначалося, зазвичай не перевищує 0,1...0,2% кількості газу, що надходить на очищення, і враховується відповідним збільшенням V_1 у формулі (3.44).

Обчисливши по (3.44) і (3.45) площу фільтрувальної поверхні, вибирають за каталогами відповідний фільтр або групу фільтрів і визначають фактичну швидкість фільтрування, м/с:

$$w_1 = \frac{V_1 + N_1 S_1 w_p}{S_1 (N - N_1)} \quad (3.46)$$

Втрата тиску у фільтрі (фільтрувальні елементи), Па:

$$\Delta p = \frac{817 \mu w_1 (1-m)}{d_m^2 m^3} \left[0,82 \cdot 10^{-6} d_m^{0,25} m_1^3 (1-m) h^{\frac{2}{3}} + \frac{z_1 w_1 \tau}{\rho_1} \right], \quad (3.47)$$

де μ - динамічна в'язкість газу за робочих умов, Па·с;

m - пористість шару пилу, частки;

d_m - середній розмір частинок пилу, визначений методом повітропроникності, м;

m_1 - пористість фільтрувальної тканини, частки;

h - питомий гідравлічний опір нової (чистої) тканини, віднесений до товщини, рівної 1 м, при швидкості фільтрування повітря 1 м/с, Па;

z_1 - запиленість газу, що очищають, кг/м³;

τ - час між регенераціями, с;

ρ_1 - густина пилу, кг/м³.

Значення m_1 , і h для деяких фільтрувальних тканин наведені у табл. 3.14.

Пористість шару пилу m залежить від режиму фільтрування, крупності й властивостей пилу, вологості і температури газу і деяких інших чинників. В умовах металургійного виробництва порядок величини $m = 0,8-0,95$.

При заданому значенні втрати тиску у фільтрі залежність (3.47) дозволяє визначити час між регенераціями фільтра або швидкість фільтрування.

Таблиця 3.14 - Деякі властивості фільтрувальних тканин

Тканина	Термо- стійкість, °С	Стійкість до впливу		Пористість, частки	Питомий гідравлічний опір, Па
		кислот	лугів		
Бавовна	65...80	Низька	Висока	0,6	-
Шерсть	80...100	Невисока	Низька	0,86...0,91	$0,84 \cdot 10^5$
Нітрон	120	Висока	Невисока	0,83	$1,8 \cdot 10^5$
Лавсан	140	"	"	0,75	$3,5 \cdot 10^5$
Скло	250...300	"	"	0,55	$8,4 \cdot 10^5$
Оксалон	250	Висока	-	-	$7,2 \cdot 10^5$

Режим роботи фільтра (швидкість фільтрування та допустиме значення втрати тиску) також може бути обраний на підставі експериментальних даних, отриманих на дослідних установках в промислових умовах.

3.6.3 Розрахунок рукавного фільтру типу ФРІР

Початкові дані для розрахунку:

1) Об'ємна витрата газу, що очищається, при р.у. $V=160 \text{ м}^3/\text{с}$.

- 2) Щільність газу при р. у. $\rho_1 = 1,04 \text{ кг/м}^3$.
- 3) Температура газу, $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 4) Запиленість газу, що поступає на очищення, $z_1 = 4 \text{ г/м}^3$.
- 5) Розрідження перед фільтром, $P_r = -1,1 \text{ кПа}$.
- 6) Середній медіанний діаметр частинок пилу, $d_m = 4 \text{ мкм}$.
- 7) Щільність частинок пилу $\rho_{\text{ч}} = 2000 \text{ кг/м}^3$.

Питоме газове навантаження або швидкість фільтрації, згідно з паспортними даними фільтру типу ФРІР, $1,5 - 2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$. Приймаємо питоме газове навантаження на фільтр рівне $q = 1,7 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$.

Площа необхідної фільтруючої поверхні, м^2 :

$$F = \frac{V}{q} = \frac{160 \cdot 60}{1,7} = 5647 \text{ м}^2. \quad (3.48)$$

Вибираємо рукавний фільтр типу ФРІР-5700, технічна характеристика якого приведена нижче:

1. Продуктивність по газу, що очищається, тис. $\text{м}^3/\text{год}$.	513– 684
2. Питоме газове навантаження, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$	1,5 – 2,0
3. Площа фільтрації, м^2	5700
4. Допустима температура газу, що очищається, $^\circ\text{C}$	не більше 135
5. Масова концентрація пилу в газі, що очищається, г/м^3 на вході у фільтр	до 50
на виході з фільтру	не більше 0,02
6. Гідравлічний опір фільтру, Па	не більше 2500
7. Кількість фільтрувальних рукавів, шт	2688
8. Розмір рукава фільтрувального, мм діаметр внутрішній	135
довжина	5200
9. Маса фільтру, кг	149500
10. Маса шатра фільтру, кг	65000

Рукавні фільтри типу ФРІР добре працюють з фільтрувальними рукавами виготовленими з поліефірного іглопробивного полотна з каркасом з філаментних ниток.

Визначимо фактичне газове навантаження на фільтр:

$$q_{\text{ф}} = \frac{V}{F_{\text{ф}}} = \frac{160}{5700} = 0,028 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с} = 1,68 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}. \quad (3.49)$$

Повний гідравлічний опір фільтру $\Delta P_{\text{ф}}$ складається з опору корпусу $\Delta P_{\text{к}}$ і опори фільтрувальної перегородки $\Delta P_{\text{ф.п}}$, Па:

$$\Delta P_{\text{ф}} = \Delta P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{ф.п}}. \quad (3.50)$$

Гідравлічний опір корпусу фільтру:

$$\Delta P_k = \zeta \frac{\rho_g \cdot W_{BX}^2}{2}, \quad (3.51)$$

де ρ_g - щільність газу за робочих умов, г/м³;

W_{BX} - швидкість газу, що приймається, у вхідному патрубку фільтру; $W_{BX} = 8$ м/с;

ζ - коефіцієнт гідравлічного опору корпусу; для правильно сконструйованих рукавних фільтрів зазвичай складає 1,5 – 2,0, приймаємо $\zeta = 2$.

$$\Delta P_k = 2 \frac{1,04 \cdot 8^2}{2} = 66,56 \approx 67 \text{ Па.}$$

Опір фільтрувальної перегородки фільтру, Па:

$$\Delta P_{\phi.п} = \Delta P_T + \Delta P_{ш.п.}, \quad (3.52)$$

де ΔP_m – гідравлічний опір тканині фільтру, Па:

$$\Delta P_T = A \cdot W_{\phi} \cdot \mu_{г.см.}; \quad (3.53)$$

де A – постійна фільтрування;

W_{ϕ} – швидкість фільтрування, м/с; $W_{\phi} = q_{\phi} = 1,68 \text{ м/хв} = 0,028 \text{ м/с}$;

$\mu_{г.см.}$ - динамічна в'язкість газової суміші при р.у.

$\Delta P_{ш.п.}$ – гідравлічний опір шару, що накопичується, пилу, Па:

$$\Delta P_{ш.п.} = \Delta P_{\phi} - \Delta P_k - \Delta P_T. \quad (3.54)$$

Час періоду між регенераціями рукавного фільтру визначимо по формулі:

$$t_p = \frac{\Delta P_{\tilde{N}.i}}{B \cdot W_{\phi}^2 \cdot \mu_{\tilde{m}} \cdot z_1}, \quad (3.51)$$

де B – постійна фільтрування;

z_1 - концентрація пилу в газі перед фільтром, г/м³.

Розраховуємо постійні фільтрування A і B :

$$A = 0,475 \frac{(1 - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_{\phi}^{3,24} \cdot \varepsilon_i^3 \cdot d_m^{1,77}}, \quad (3.52)$$

$$B = 817 \frac{(1 - \varepsilon_i)}{d_m^2 \cdot \varepsilon_n^3 \cdot \rho_{\div}}, \quad (3.53)$$

де ε_n - пористість шару пилю; $\varepsilon_n = 1 - 79d_m^{0,47} = 1 - 79(4 \cdot 10^{-6})^{0,47} = 0,77$;

$\varepsilon_{тк}$ - пористість тканини (іглопробивний поліефірний фетр), долі од.; $\varepsilon_{тк} = 0,75$;

d_m - середній медіанний розмір частинок пилю, м;

$\rho_{\div}$ - щільність частинок пилю, г/м³.

$$A = 0,475 \frac{(1 - 0,77)^2}{0,75^{3,24} \cdot 0,77^3 \cdot (4 \cdot 10^{-6})^{1,77}} = 501 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1};$$

$$B = 817 \frac{(1 - 0,77)}{(4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (0,77)^3 \cdot 2000} = 12,86 \cdot 10^9 \text{ м/кг}.$$

Обчислюємо динамічний коефіцієнт в'язкості газу:

$$\mu_{\text{CO}_2} = 13,7 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 254}{273 + 50 + 254} \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^{1,5} = 16,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{\text{CO}} = 16,6 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 100}{273 + 50 + 100} \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^{1,5} = 16,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{\text{H}_2} = 20,3 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 73}{273 + 50 + 73} \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^{1,5} = 22,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 17 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 114}{273 + 50 + 114} \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^{1,5} = 19,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Знаходимо динамічну в'язкість суміші:

$$\mu_{\text{см}} = (18,8 \cdot 16,1 + 22,3 \cdot 16,3 + 9,0 \cdot 22,8 + 49,9 \cdot 19,4) 10^{-6} / 100 = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Гідравлічний опір тканині, Па:

$$\Delta P_T = 501 \cdot 10^6 \cdot 0,028 \cdot 18,4 \cdot 10^{-6} = 258 \text{ Па}.$$

Гідравлічний опір шару пилю визначимо, прийнявши опір рукавного фільтру $\Delta P = 2000 \text{ Па}$, тоді:

$$\Delta P_{\text{ш.п.}} = 2000 - 67 - 258 = 1675 \text{ Па}.$$

Тривалість періоду фільтрування між двома регенераціями:

$$t_{\delta} = \frac{1675}{12,86 \cdot 10^9 \cdot 0,028^2 \cdot 18,4 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 2257 \text{ h} \approx 37 \text{ d}$$

Визначимо ефективність рукавного фільтру. Якщо прийняти залишкову запиленість газу $z_2 = 20 \text{ мг/м}^3$, виходячи з технічної характеристики роботи рукавного фільтру марки ФРІР-5700, тоді

$$\eta = (z_1 - z_2) / z_1 = (4 - 0,02) / 4 = 0,995 \text{ або } 99,5 \%. \quad (3.54)$$

3.7 Розрахунок сухого пластинчастого електрофільтру

3.7.1 Пристрій і принцип дії сухого пластинчастого електрофільтру

Пластинчасті електрофільтри типу ЕГА призначені для сухого високоефективного очищення газів, що утворюються при різноманітних технологічних процесах у різних галузях промисловості (чорна та кольорова металургія, хімічна і нафтова промисловість та ін.) Зокрема, ці електрофільтри застосовують для очищення від золи димових газів теплових електростанцій, від пилу газів, що відходять від мартенівських печей та інших агрегатів металургійних заводів.

Електрофільтри типу ЕГА (рис. 3.7) - багатопільні односекційні апарати прямокутної форми зі сталевим корпусом. Прийнято наступне умовне позначення типорозмірів електрофільтрів, наприклад, ЕГА-1-10-6-4-2: Е - електрофільтр; Г - з горизонтальним ходом газу; А1 - модифікація; цифри по порядку 10 - число газових проходів; 6 - активна висота електродів, м; 4 - число елементів електрода по довжині (ширина одного елемента 0,64 м), що і буде становити активну довжину поля 2,56 м, 2 - кількість електричних полів.

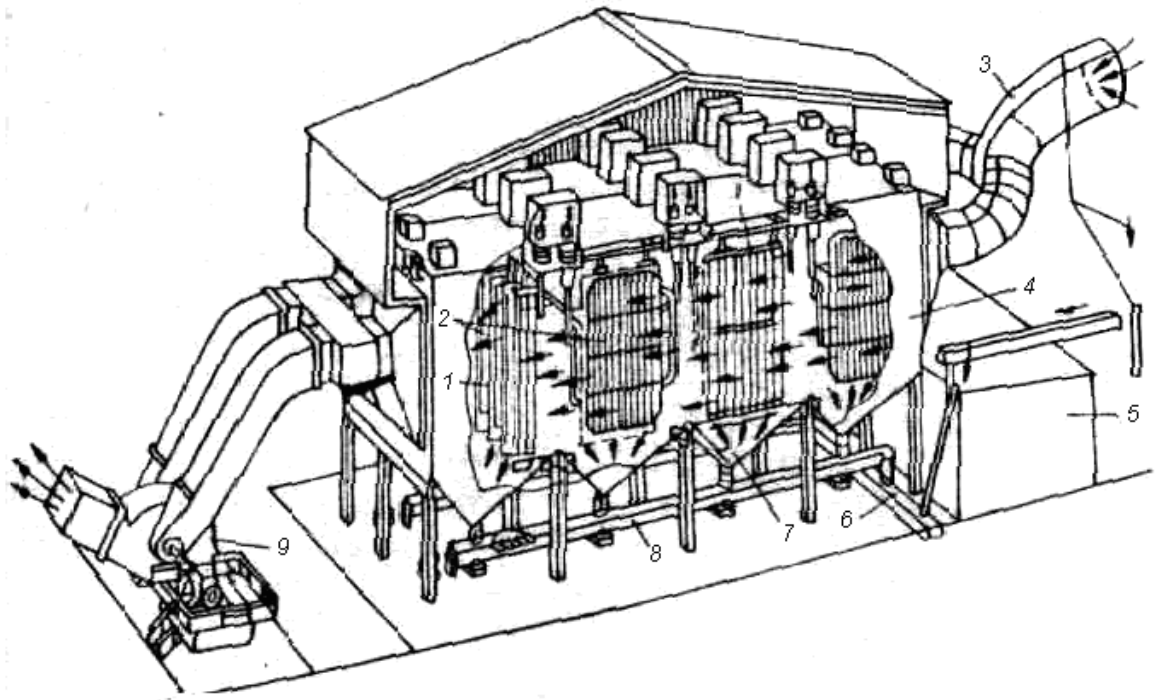
Електрофільтри призначені для очищення газів при температурах, що не перевищують 330°C . Найбільша допустима концентрація пилу в газі, що очищається, - 50 г/м^3 . Гідравлічний опір електрофільтрів - 150 Па, допустиме розрідження на вході в електрофільтр - 4 кПа.

Питома витрата електроенергії на очищення 1000 м^3 газу - 0,3 кВт·год.

Промисловість випускає 41 типорозмір електрофільтрів типу ЕГА. Електродна система електрофільтрів складена з широкосмугових (0,64м) електродів відкритого профілю та рамних коронуючих електродів з голчастими елементами при міжелектродної відстані 0,300м. Номінальна висота електродів приймається з ряду: 6; 7,5; 9; 12.

По довжині осаджувальний електрод набирають з 4-8 елементів, що дає активну довжину поля відповідно 2,56; 3,2; 3,84; 4,48; 5,12м; по ширині електрофільтри мають від 10 до 88 газових проходів. Найменша площа активного перетину для проходу газу - $16,5 \text{ м}^2$, найбільша - $285,6 \text{ м}^2$.

Конструктивні параметри електрофільтрів наведені в табл. 3.15.



1 - коронуючі електроди, 2 - освітлювальні (пластинчасті) електроди, 3 - газопровід газу, що надходить на очищення; 4 - корпус електрофільтру, 5 - приміщення електроапаратури; 6, 8 - гвинтові транспортери, 7 - бункер уловленої пилу; 9 - димотяг (ексгаустер)

Рисунок 3.7 - Схема пластинчастого горизонтального електрофільтру

Електрофільтри модифікації А1 можна встановлювати поза будівлею з пристроєм шатра над дахом і механізмами обтрушування електродів, електрофільтри модифікації А2 встановлюються поза будівлею без намету.

3.7.2 Методика розрахунку електрофільтру

В даний час при проектуванні електрофільтрів очікувану ступінь очищення газів розраховують по напівемпіричних формулах. Після вибору типу електрофільтру, що задовольняє вимогам проекту, на підставі наявних вихідних даних обчислюють такі величини.

Відношення густини газу, що очищують, за робочих умов до густини при стандартних умовах ($p_{CT}=101,3$ КПа; $t_{CT}=20$ °С):

$$\beta = \frac{p_{газ}(273+t_{CT})}{p_{CT}(273+t)}, \quad (3.55)$$

де p і p_{CT} - тиск відповідно газу, що очищають, і при стандартних умовах, КПа;
 t_{CT} і t - температура відповідно при стандартних умовах і газу, що очищають, °С.

Таблиця 3.15 - Конструктивні параметри електрофільтрів ЕГА

Типорозмір електрофільтру	Активна висота електродів, м	Число полів	Площа активного перерізу S, м	Загальна площа осадження S ₀ , м ²	Габаритні розміри електрофільтру, м			$T = \frac{S_0}{S}$
					Довжина	Ширина (по осях опон)	Висота	
ЕГА1-10-6-4-2	6,0	2	16,5	630	9,26	3,2	12,4	38,2
ЕГА1-10-6-4-2	6,0	3	16,5	950	13,44	3,2	12,4	57,6
ЕГА1-10-6-6-2	6,0	2	16,5	950	11,82	3,2	12,4	57,6
ЕГА1-10-6-6-3	6,0	3	16,5	1430	17,28	3,2	12,4	86,7
ЕГА1-14-7,5-4-3	7,5	3	28,7	1660	13,44	4,4	13,9	57,8
ЕГА1-14-7,5-4-4	7,5	4	28,7	2210	17,62	4,4	13,9	77,0
ЕГА1-14-7,5-6-2	7,5	2	28,7	1660	11,82	4,4	14,9	57,8
ЕГА1-14-7,5-6-3	7,5	3	28,7	2480	17,28	4,4	14,9	86,4
ЕГА1-20-7,5-4-3	7,5	3	41,0	23,60	13,44	6,2	15,4	57,6
ЕГА1-20-7,5-4-4	7,5	4	41,0	3160	17,62	6,2	15,4	77,0
ЕГА1-20-7,5-6-2	7,5	2	41,0	2360	11,82	6,2	15,4	57,6
ЕГА1-20-7,5-6-3	7,5	3	41,0	3550	17,28	6,2	15,4	86,6
ЕГА1-20-9-6-2	9,0	2	49,0	2830	11,82	6,2	16,9	57,7
ЕГА1-20-9-6-3	9,0	3	49,0	4240	17,28	6,2	16,9	86,5
ЕГА1-20-9-6-4	9,0	4	49,0	5660	22,74	6,2	16,9	115,5
ЕГА1-30-7,5-4-3	7,5	3	61,4	3550	13,44	9,2	14,9	57,8
ЕГА1-30-7,5-4-4	7,5	4	61,4	4730	17,62	9,2	14,9	77,0
ЕГА1-30-7,5-6-2	7,5	2	61,4	3550	11,82	9,2	14,9	57,8
ЕГА1-30-7,5-6-3	7,5	3	61,4	5320	17,28	9,2	14,9	86,7
ЕГА1-30-9-6-2	9,0	2	73,4	4240	11,82	9,2	16,4	57,8
ЕГА1-30-9-6-3	9,0	3	73,4	6460	17,28	9,2	16,4	88,0
ЕГА1-30-9-6-4	9,0	4	73,4	8480	22,74	9,2	16,4	115,5
ЕГА1-30-12-6-3	12,0	3	97,4	8430	17,28	9,2	19,4	86,5
ЕГА1-30-12-6-4	12,0	4	97,4	11240	22,74	9,2	19,4	115,4
ЕГА1-40-7,5-4-3	7,5	3	81,9	4730	13,44	12,2	15,4	57,7
ЕГА1-40-7,5-4-4	7,5	4	81,9	6310	17,62	12,2	15,4	77,0
ЕГА1-40-7,5-6-2	7,5	2	81,9	4730	11,82	12,2	15,4	57,5
ЭГА1-40-7,5-6-3	7,5	3	81,9	7100	17,28	12,2	15,4	86,7
ЕГА1-40-9-6-2	9,0	2	97,9	5650	11,28	12,2	16,9	57,7
ЕГА1-40-9-6-3	9,0	3	97,9	8480	17,28	12,2	16,9	86,6
ЕГА1-40-9-6-4	9,0	4	97,9	11300	22,74	12,2	16,9	115,4
ЕГА1-40-12-6-2	12,0	3	129,8	11240	17,28	12,2	19,9	89,5
ЕГА1-40-12-6-3	12,0	4	129,8	15000	22,74	12,2	19,9	115,6
ЕГА2-48-12-6-3	12,0	3	155,8	13500	17,28	15,2	19,9	86,6
ЕГА2-48-12-6-4	12,0	4	155,8	18000	22,74	15,2	19,9	115,3
ЕГА2-56-12-6-3	12,0	3	181,7	15750	17,28	17,6	19,9	86,7
ЕГА2-56-12-6-4	12,0	4	181,7	21000	22,47	17,6	19,9	115,6
ЕГА2-76-12-6-3	12,0	3	246,6	21400	17,28	23,6	19,9	86,8
ЕГА2-76-12-6-4	12,0	4	246,6	28500	22,47	23,6	19,9	115,6
ЕГА2-88-12-6-3	12,0	3	285,6	24750	17,28	27,2	19,9	86,7
ЕГА2-88-12-6-4	12,0	4	285,6	33000	22,74	27,2	19,9	115,5

Критична напруженість електричного поля, В/м:

$$E_{KP} = 3,4 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \quad (3.56)$$

де R_1 - радіус вістря коронуючого електрода; $R = 1$ мм.

Критична напруга корони, В:

$$U_{KP} = E_{KP} R_1 \left(\frac{\pi H}{S_1} - 2,3 Lg \frac{2\pi R_1}{S_1} \right), \quad (3.57)$$

де H - відстань між площинами коронуючих і осаджувальних електродів, м;

S_1 - крок електродів, м.

Для електрофільтрів типу ЕГА: $H = \frac{0,300}{2}$ м; $S_1 = 0,18$ м.

Напруженість електричного поля, В/м:

$$E = \left[\frac{8\pi f H U (U - U_{KP})}{9 \cdot 10^9 \varepsilon_0 S_1^3 \left(\frac{\pi H}{S_1} - 2,3 Lg \frac{2\pi R_1}{S_1} \right)} \right]^{0,5}, \quad (3.58)$$

де f - коефіцієнт, що залежить від відношення H/S_1 , при $\frac{H}{S_1} = \frac{0,300}{2 \cdot 0,18} = 0,833$; f

$= 0,0423$;

U - середнє значення робочої напруги (60 ... 100 кВ), В.

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - діелектрична стала вакууму.

Швидкість дрейфу частинок пилу в електричному полі, м/с:

- при розмірі частинок понад 1 мкм:

$$w = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} E_r^2}{\mu}, \quad (3.59)$$

де r - еквівалентний радіус частинки пилу, м;

μ - динамічний коефіцієнт в'язкості газу за робочих умов, Па·с;

- при розмірі частинок менше 1 мкм.

$$w = 0,17 \cdot 10^{-11} \frac{Ec}{\mu}, \quad (3.60)$$

де $c = 1 + \frac{A\lambda}{r}$ - поправка Кенінгема - Міллікена;

A - чисельний коефіцієнт, що дорівнює 0,815 ... 1,63;

λ - довжина середнього вільного пробігу молекул газу, м.
Фракційна ступінь вловлювання пилу:

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{wT}{2U}\right), \quad (3.61)$$

де T - відношення загальної площі осаджувальних електродів до площі активного перерізу електрофільтру (див. табл. 3.15);

W - швидкість газу в електрофільтрі, м/с.

Загальна ступінь вловлювання пилу, %:

$$\eta = \sum_1^n \eta_i \Phi_i, \quad (3.62)$$

де Φ_i - вміст у вловлюваному пилу i -ї фракції, %.

Необхідна мінімальна ефективність очищення газу від пилу, %:

$$\eta_{TP} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} 100, \quad (3.63)$$

де i - відповідно початкова та кінцева запиленість газу, г/м.

Необхідна площа активного перерізу електрофільтру, м²:

$$S = \frac{V}{3600W}, \quad (3.64)$$

де V - продуктивність електрофільтру, м³/ч.

3.7.3 Приклад розрахунку електрофільтру типу ЕГА

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

- обсяг газу, що надходить на очищення, за робочих умов $V = 10^6$ м³/год;
- температура газу $t = 30$ °С;
- розрідження на вході в електрофільтр $P_1 = 1$ кПа;
- динамічний коефіцієнт в'язкості газу за робочих умов $\mu = 18,65 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
- початкова запиленість газу $Z_1 = 1,4$ г/м³;
- необхідна найбільша запиленість очищеного газу $Z_2 = 0,05$ г/м³.

Дисперсний (фракційний) склад уловлюваного пилу:

Крупність, мкм	< 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10
Масова частка, %	52	22	6,4	7,6	2,7	9,3

За формулою (3.55) визначається відносна густини газу, що очищається, при стандартних умовах:

$$\beta = \frac{(101,3 - 1) \cdot 293}{101,3 \cdot (273 + 30)} = 0,957.$$

Критична напруженість електричного поля (формула (3.56)):

$$E_{kp} = 3,04 / 0,957 + 0,0311 \cdot \sqrt{0,957 / (0,001)} \cdot 10^6 = 5,83 \cdot 10^6 \text{ В/м.}$$

Критичне напруження корони (формула (3.57)):

$$U_{kp} = 5,833 \cdot 10^6 \cdot 0,001 \left(\frac{3,14 \cdot 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right) = 34,84 \cdot 10^3 \text{ В.}$$

Напруженість електричного поля при робочій напрузі $U = 85 \text{ кВ}$ (формула(3.58)):

$$E = \left[\frac{8 \cdot 3,14 \cdot 0,0423 \cdot 0,15 \cdot 85(85 - 34,84) \cdot 10^6}{9 \cdot 10^9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,18^3 \left(\frac{3,14 \cdot 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right)} \right]^{0,5} = (2,14 \cdot 10^{11})^{0,5} = 4,9 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

Швидкість дрейфу частинок пилу розміром 1 мкм (формула (3.59)):

$$\omega_1 = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot 2,4 \cdot 10^{11} \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}{18,65 \cdot 10^{-6}} = 0,076 \text{ м/с.}$$

Аналогічним чином обчислюють швидкості дрейфу частинок крупністю 3, 5, 7, 9 і 10 мкм. Результати розрахунку наведені в табл. 3.16.

Таблиця 3.16 - Фракційний склад і швидкість дрейфу частинок пилу в електрофільтрі

Показники	Розмір частинок пилу, мкм					
	<2	2-4	4-6	6-8	2-10	>10
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 фракції Φ_i , %	52	22	6,4	7,6	2,7	9,3
Швидкість дрейфу частинок w , м/с	0,076	0,2282	0,3802	0,5323	0,6844	0,7605

Усереднені значення відношень площі осаджувальних електродів S_o до площі активного перерізу S електрофільтрів ЕГА (див. табл. 3.15) зведені в табл. 3.17.

Приймаються значення швидкості газу, що очищається, в електрофільтрі W , рівні 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 м/с і обчислюються за формулами (3.61) і (3.62), фракційні і загальні ступеня вловлювання пилу для зазначених швидкостей газу W і наведених у табл. 3.16 і 3.17 значень w і T .

Необхідна ступінь вловлювання пилу при початковій запиленості $Z_1 = 1,4$ г/м³ і кінцевої $Z_2 = 0,05$ г/м³:

$$\eta_{TP} = \frac{1,4 - 0,05}{1,4} \cdot 100 = 96,4 \text{ \%}.$$

Таблиця 3.17 - Значення відношень загальної площі осаджувальних електродів до площі активного перерізу електрофільтрів ЕГА

Прийняте позначення типорозміру електрофільтру	Типорозмір електрофільтру	Відношення загальної площі осаджувальних електродів до площі активного перерізу електрофільтру
T_1	ЕГА1-10-6-4-2;	38,2
T_2	ЕГА1-10-6-4-3; ЕГА1-10-6-6-2; ЕГА1-14-7,5-4-3 ; ЕГА1-14-7,5-6-2; ЕГА1-20-7,5-4-3; ЕГА1-20-7,5-6-2; ЕГА1-20-9-6-2; ЕГА1-30-7,5-4-3; ЕГА1-30-7,5-6-2; ЕГА1-30-9-6-2; ЕГА1-40-7,5-4-3; ЕГА1-40-7,5-6-2; ЕГА1-40-9-6-2	57,7
T_3	ЕГА1-14-7,5-4-4; ЕГА1-20-7,5-4-4; ЕГА1-30-7,5-4-4; ЕГА1-40-7,5-4-4;	77,0
T_4	ЕГА1-10-6-6-3; ЕГА1-14-7,5-6-3; ЕГА1-20-7,5-6-3; ЕГА1-20-9-6-3; ЕГА1-30-7,5-6-3; ЕГА1-30-12-6-3; ЕГА1-40-7,5-6-3; ЕГА1-40-9-6-3; ЕГА1-40-12-6-2; ЕГА2-48-12-6-3; ЕГА2-56-12-6-3; ЕГА2-76-12-6-3; ЕГА2-88-12-6-3	86,6
T_5	ЕГА1-30-9-6-3	88,0
T_6	ЕГА1-20-9-6-4; ЕГА1-30-9-6-4; ЕГА1-30-12-6-4; ЕГА1-40-9-6-4; ЕГА1-40-12-6-4; ЕГА2-48-12-6-4; ЕГА2-56-12-6-4; ЕГА2-76-12-6-4; ЕГА2-88-12-6-4	115,5

Досвід експлуатації електрофільтрів показує, що в більшості випадків слід приймати швидкість газу $W = 1 \dots 1,2$ м/с.

При швидкості 1,2 м/с і $\eta_{\text{тр}} = 96,4\%$ приймається до розгляду електрофільтри типорозмірів, які на графіку рис. 3.8 лежать вище необхідного ступеня (очищення T_4, T_5, T_6), оскільки електрофільтри з типорозмірами, що лежать під цією лінією, не забезпечують необхідний ступінь вловлювання пилу.

У даному випадку доцільно встановити електрофільтр типорозміру T_4 , який має менші габаритні розміри і металоємність, ніж електрофільтри типорозміру T_5 і T_6 і забезпечує необхідний ступінь вловлювання пилу.

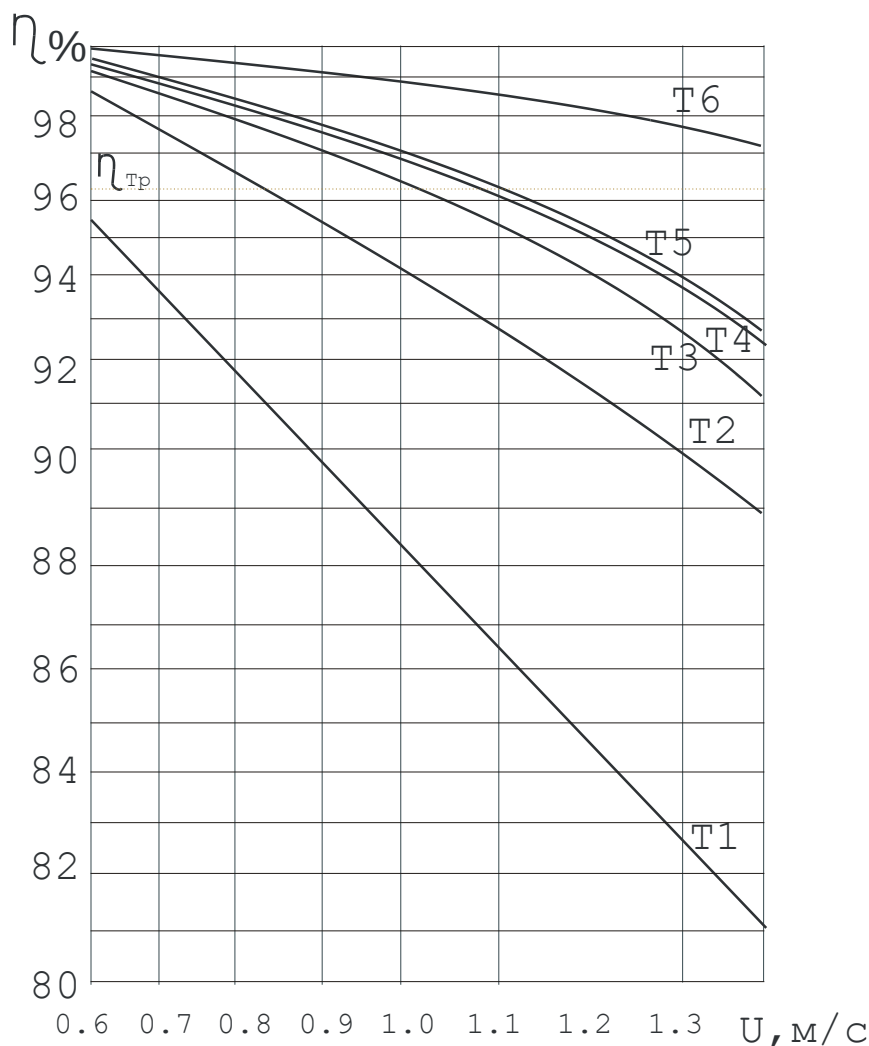


Рисунок 3.8 - Залежність ефективності очищення газу від швидкості газу й типорозміру електрофільтру

При очищенні в електрофільтрі $106 \text{ м}^3/\text{год}$ газу і швидкості газу в ньому 1,2 м/с необхідна площа активного перерізу електрофільтру:

$$S = \frac{1000000}{3600 \cdot 1,2} = 231,5 \text{ м}^2.$$

Найбільш близьким за площею активного перетину є електрофільтр типорозміру Т4-ЕГА2-74-12-6-3, у якого $S = 246,6 \text{ м}^2$. Швидкість газу, що очищається, в цьому електрофільтрі:

$$W = \frac{1000000}{3600 \cdot 246,6} = 1,13 \text{ м/с}.$$

При такій швидкості газу в електрофільтрі ступінь вловлювання пилу буде порядку 97%, що відповідає умовам розрахунку.

Додаток А

Властивості газів

Газ	Густина ρ_0 , кг/м ³	Молекуляр- на маса, кг	Молекуляр- ний об'єм, м ³	Газова постійна, Дж/(кг·К)	Теплоємність при 20°C і 0,101 МПа
Азот	1,251	28,02	0,0312	297	1,04
Водень	0,089	2,016		4160	
Аміак	0,771	17,03	0,0258	488	2,24
Повітря	1,293	28,98	0,0299	288	1,01
Водяна пара	0,804	18,02	0,0189	430	2,01
Діоксид азоту	2,055	46,01	0,0317	180	0,802
Діоксид сірки	2,927	64,07	0,0448	130	0,631
Діоксид вуглецю	1,976	44,01	0,0340	189	0,896
Кисень	1,429	32,00	0,0256	260	0,911
Метан	0,717	16,04	0,0296	519	2,220
Оксид вуглецю	1,250	28,01	0,0307	297	1,050
Сірководень	1,539	34,08	0,0330	244	1,060
Хлор	3,217	70,91	0,0484	117	0,482
Хлористий водовід	1,639	36,47	0,0283	228	0,778
Фтористий водовід	0,893	20,01	0,0124	413	1,422
Диметил-сульфід	2,765	62,09	0,0770	134	-
Метил-меркаптан	2,139	48,08	0,0510	173	-

Додаток Б

Основні фізичні властивості деяких газів

Газ	Формула	Постійна Сезерленда, С'	Коефіцієнт динамічної в'язкості $\mu_0 \cdot 10^6$, Па·с при н.у.
Азот	N ₂	114	17
Водень	H ₂	73	8,42
Водяна пара	H ₂ O	961	10,0
Повітря	-	124	17,3
Оксид вуглецю	CO	100	16,6
Діоксид вуглецю	CO ₂	254	13,7
Кисень	O ₂	131	20,3
Метан	CH ₄	162	10,3

Додаток В

Об'ємна ізобарна теплоємність деяких газів C середня в інтервалах температур від 0 до $t^{\circ}\text{C}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$

$t, ^{\circ}\text{C}$	N_2	O_2	CO_2	H_2O	CO	H_2	CH_4	Повітря
0	1,299	1,306	1,600	1,494	1,299	1,277	1,544	1,297
100	1,300	1,318	1,700	1,505	1,302	1,291	1,653	1,301
200	1,304	1,335	1,787	1,522	1,307	1,296	1,765	1,307
300	1,311	1,356	1,763	1,542	1,317	1,299	1,890	1,317
400	1,320	1,377	1,930	1,565	1,329	1,302	2,019	1,329
500	1,332	1,398	1,989	1,590	1,343	1,305	2,144	1,343
600	1,345	1,417	2,041	1,615	1,357	1,308	2,264	1,356
700	1,359	1,437	2,088	1,641	1,372	1,312	2,381	1,371
800	1,372	1,450	2,131	1,668	1,386	1,317	2,490	1,384
900	1,385	1,464	2,169	1,696	1,400	1,323	2,591	1,398
1000	1,397	1,477	2,203	1,723	1,413	1,329	2,690	1,410
1100	1,409	1,489	2,235	1,750	1,425	1,336	-	1,421
1200	1,420	1,501	2,264	1,777	1,436	1,343	-	1,433
1300	1,431	1,511	2,290	1,803	1,446	1,351	-	1,443
1400	1,441	1,520	2,314	1,828	1,457	1,359	-	1,453
1500	1,450	1,594	2,335	1,853	1,466	1,367	-	1,462

Додаток Г

Значення ентальпії газів i при температурі t , $\text{кДж}/\text{м}^3$

$t, ^{\circ}\text{C}$	CO_2	N_2	O_2	H_2	CO	CH_4	H_2O	Повітря
0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	170,0	129,8	131,9	129,2	130, 2	160,9	150, 7	132,3
200	357,5	260,0	267,1	259,6	261,5	349,4	304,4	266,3
300	559,0	391,9	407,0	390,6	395,7	563,2	462,7	402,8
400	772,1	526,7	551,0	521,7	532,2	800,7	626,4	541,8
500	996,5	664,1	699,2	654,0	671	1060,2	794,7	684,1
600	1222,6	803,9	850,0	785,9	802,2	1341,8	967,2	829,9
700	1461,2	946,3	1004,9	919,5	960,7	1549,5	1147,2	979,7
800	1704,1	1092,0	1159,8	1086,9	1110,3	1968,3	1335,6	1130,5
900	1951,1	1243,5	1318,9	1241,3	1261,1	2300,3	1524,1	1281,2
1000	2202,4	1394,3	1478,0	1330,2	1414,4	2647,0	1725,0	1436,1
1100	2457,8	1545,0	1637,1	1469,6	1570,1	-	1926,0	1595,2
1200	2717,4	1695,7	1800,4	1614,5	1726,3	-	2131,2	1765,3
1300	2976,9	1850,6	1963,7	1758,5	1926,8	-	2344,7	1913,4
1400	3240,7	2009,8	2127,0	1904,2	2042,8	-	2558,2	2076,7
1500	3504,5	2164,7	2294,5	2072,5	2199,8	-	2780,2	2240,0

Додаток Д

Термодинамічні властивості води і сухої насиченої водяної пари по
температурах *

t °C	p _н , гН/м ²	v', м ³ /кг	v'', м ³ /кг	ρ'', кг/м ³	i', кДж/кг	i'', кДж/кг
0	0,6108	0,0010002	206,3	0,004847	0,000	2600,8
5	0,8718	0,0010001	147,2	0,006793	21,06	2510,0
10	1,271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2
15	1,704	0,00100010	77,97	0,01282	62,97	2528,4
20	2,337	0,0010018	57,84,	0,01729	83,90	2537,2
25	3,167	0,0010030	43,40	0,2304	104,80	2546,4
30	4,241	0,0010044	32,93	0,03036	125,59	2555,6
35	5,622	0,0010060	25,25	0,03960	146,58	2564,8
40	7,375	0,0010079	19,55	0,05115	167,51	2573,6
45	9,582	0,0010099	15,28	0,06545	188,41	2582,4
50	12,335	0,0010121	12,05	0,08302	209,30	2591,6
55	15,741	0,0010145	9,578	0,1044	230,19	2600,4
60	19,82	0,0010171	7,678	0,1302	251,12	2609,2
65	25,01	0,0010199	6,201	0,1613	272,06	2617,6
70	31,16	0,0010228	5,045	0,1982	292,99	2626,4
75	38,55	0,0010258	4,133	0,2420	313,97	2634,8
80	47,36	0,0010290	3,409	0,2933	334,94	2643,1
85	57,80	0,0010324	2,828	0,3536	355,96	2651,5
90	70,11	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5
95	84,52	0,0010396	1,982	0,5045	398,04	2667,8
100	101,32	0,0010435	1,673	0,5977	419,10	2675,8
105	120,80	0,0010474	1,419	0,7047	440,20	2683,3
110	143,27	0,0010515	1,210	0,8263	461,34	2691,3
115	169,06	0,0010558	1,037	0,9647	482,53	2693,8
120	198,54	0,0010603	0,8917	1,122	503,7	2706,3
125	232,08	0,0010649	0,7704	1,298	525,0	2713,5
130	270,11	0,0010697	0,6688	1,496	546,4	2720,6
140	361,5	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734,1
150	476,1	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746,7
160	618,2	0,0011021	0,3068	3,258	675,4	2758,0
180	1002,7	0,0011275	0,1939	5,157	763,2	2778,4
200	1555,6	0,0011565	0,1272	7,862	852,5	2793,1
220	2320,9	0,0011900	0,0861	11,62	943,8	2801,5
240	3349,1	0,0012291	0,0597	16,76	1037,5	2803,2
260	4696,1	0,0012755	0,0422	23,72	1135,1	2004,9

* - Величини з одним штрихом відносяться до води, з двома штрихами - до пари.

Додаток Е

Значення нормальної функції розподілу

х	Φ(х)	х	Φ(х)	х	Φ(х)	х	Φ(х)
1	2	3	4	5	6	7	8
-2,70	0,035	-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
-1,54	0,0616	-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

Продовження додатку Е

1	2	3	4	5	6	7	8
-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
-1,28	0,1003	-0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
-1,26	0,1038	-0,20	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
-1,24	0,1075	-0,18	0,4286	0,88	0,8106	1,96	0,9750
-1,22	0,1112	-0,16	0,4364	0,90	0,8159	1,98	0,9761
-1,20	0,1151	-0,14	0,4443	0,92	0,8212	2,00	0,9772
-1,18	0,1190	-0,12	0,4522	0,94	0,8264	2,10	0,9821
-1,16	0,1230	-0,10	0,4602	0,96	0,8315	2,20	0,9861
-1,14	0,1271	-0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,30	0,9893
-1,12	0,1314	-0,06	0,4761	1,00	0,8313	2,40	0,9918
-1,10	0,1357	-0,04	0,4840	1,02	0,8461	2,50	0,9938
-1,08	0,1401	-0,02	0,4920	1,04	0,8508	2,60	0,9953
				1,06	0,8554	2,70	0,9965

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 2. Методи очищення стічних вод : підручник / Петрук В. Г., Васильківський І. В., Петрук Р. В., Сакалова Г. В. та ін. – Херсон : Олді-плюс, 2019. – 298 с.
2. Василенко І.А., Скиба М.І., Півоваров О.А., Воробйова В.І. Теоретичні основи охорони навколишнього середовища / І.А. Василенко, М.І. Скиба, О.А. Півоваров, В.І. Воробйова. Дніпро: Акцент ПП, 2017. – 204 с.
3. Л.Ф. Долина, П.Б. Машихіна, В.А. Козачина. Реконструкція систем водопостачання та водовідведення: Монографія: – Дніпро: Журфонд, 2021. – 220 с.
4. Войцицький А. П., Дубровський В. П., Боголюбов В. М. Техноекологія : підручник / за ред. В. М. Боголюбова. Херсон : Аграрна освіта, 2009. 533 с. URL: <http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054289.pdf>.
5. Технології захисту навколишнього середовища. Ч.1. Захист атмосфери: підручник. Петрук В.Г., Васильківський І.В., Петрук Р.В. та ін. – Херсон: Олді-плюс, 2019. – 432 с
6. Екологічні основи управління водними ресурсами : навч. посіб. / А. І. Томільцев та ін. Київ : Ін-т еколог. Упр. та збаланс. природокористування, 2017. 200 с. URL: <http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi72/0053271.pdf>.
7. Природоохоронні технології. Частина 1. Захист атмосфери: навчальний посібник / Северин Л. І., Петрук В. Г., Безвозюк І. І., Васильківський І. В. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 388 с.
8. Зубик С. В. Техноекологія. Джерела забруднення і захист навколишнього середовища : навч. посіб. Львів : Оріяна-Нова, 2007. 400 с.
9. Іваненко О. В., Носачова О. В. Техноекологія : підручник. Київ : Кондор, 2017. 294 с. URL: <http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054287.pdf>.
10. Климченко М. О., Залеський І. І. Техноекологія : навч. посіб. Київ : Академія, 2011. 256 с.

- 11.Захист навколишнього середовища при роботі теплотехно-логічного устаткування: Навч. посібник / Н.А. Шаройко, А.О. Каграманян, І.П. Полтавський та ін. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 395 с.
- 12.Мальований М. С., Боголюбов В. М., Шаніна Т. П., Шмандій В. М., Сафранов Т. А. Техноекологія : підручник. Херсон : Олді-плюс, 2014. 615 с.
- 13.Нікітченко О. Ю. Конспект лекцій з дисципліни "Промислова екологія". Харків : ХНАМГ, 2013. 164 с. URL: <http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054279.pdf>.
- 14.Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г. Засоби очищення газових викидів: Навчальний посібник. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 207 с.
- 15.Станкевич С. В., Головань В. Л. Техноекологія : навч. посіб. Харків, 2020. 338 с. URL: <http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054288.pdf>.
- 16.Грес Л. П., Єрьомін О. О., Каракаш Є. О., Радченко Ю. М. Екологічні аспекти металургійних технологій (1 ч.) : навч. посібник. – Дніпро: Україн. держ. ун-т науки і технол., 2022. – 106 с.
- 17.Сухарев С. М., Чундак С. Ю., Сухарева О. Ю. Техноекологія та охорона навколишнього середовища : навч. посіб. Львів : Новий Світ-2000, 2004. 256 с.
- 18.Удод В. М., Трофімович В. В., Волошкіна О. С., Трофимчук О. М. Техноекологія : навч. посіб. Київ, 2007. 195 с.
- 19.Промислова екологія : навч. посіб. / за ред. В. Л. Филипчука. Рівне : НУВГП, 2013. 453 с. URL: <http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi59/0043767.pdf>.

Навчально-методичне видання
(українською мовою)

Укладачі:
Кожемякін Геннадій Борисович,
Прутцьков Дмитро Володимирович,
Вагін Андрій Вікторович

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ

Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
«Технології захисту атмосфери та водних екосистем»
для здобувачів ступеня вищої освіти магістра
спеціальності 183 Технології захисту навколишнього середовища
освітньо-професійної програми
«Технології захисту навколишнього середовища»

Рецензент *О.Г. Добровольська*
Відповідальний за випуск *Ю.О. Бєлоконь*
Коректор *Г.Б. Кожемякін*