

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

ФАКУЛЬТЕТ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Кафедра охорони праці та навколишнього середовища

**ЗАХИСТ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ
ШКІДЛИВИМИ РЕЧОВИНАМИ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

«ПРОМИСЛОВА ЕКОЛОГІЯ»

Харків 2021

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри охорони праці та навколишнього середовища 23 червня 2021 р., протокол № 12.

Методичні вказівки призначено для роботи на практичних заняттях та самостійної роботи здобувачів вищої освіти спеціальності 263 «Цивільна безпека» першого (бакалаврського) рівня при вивченні дисципліни «Промислова екологія».

Розглянуто такі методи захисту атмосферного повітря від викидів промислових стаціонарних джерел забруднення, як розсіювання викидів та їх очищення від шкідливих речовин апаратами. Для гарячих і холодних викидів наведено методику розрахунків максимальної приземної концентрації шкідливої речовини, відстані, на якій вона створюється, гранично допустимого викиду, а також розрахунок екологічного податку за забруднення атмосферного повітря одиночним джерелом, з якого викидається суміш шкідливих речовин постійного складу. Надано методики розрахунків інерційного сухого апарата для очищення повітря від пилу – циклона та апарата для очищення від газів – адсорбера.

Укладач

доц. С. О. Кисельова

Рецензент

доц. О. В. Костиркін

ЗМІСТ

1 Зменшення забруднення атмосферного повітря методом розсіювання	4
1.1 Загальні положення і терміни	4
1.2 Розрахунки з розсіювання забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферу організованим точковим джерелом	8
1.2.1 Розрахунок максимальної приземної концентрації	8
1.2.2 Розрахунок відстані від джерела викиду, на якій створюється максимальна приземна концентрація шкідливої речовини.....	10
1.2.3 Встановлення гранично допустимих викидів ...	11
Завдання	11
Контрольні питання	12
2 Розрахунок екологічного податку за забруднення атмосферного повітря одиночним джерелом, з якого викидається суміш шкідливих речовин постійного складу.....	13
2.1 Загальні відомості	13
Приклад	16
Завдання	19
Контрольні питання.....	21
3 Розрахунок ефективності роботи циклона	21
3.1 Загальні відомості	21
3.2 Методика розрахунку одиночного циклона типу ЦН	22
Завдання	26
Контрольні питання	27
4 Розрахунок адсорбційної установки для очищення повітря від шкідливих газів	28
4.1 Загальні відомості	28
4.2 Методика розрахунку адсорбера	32
4.3 Порядок розрахунку адсорбційної установки	35
Приклад розрахунку адсорбера	36
Завдання.....	39
Контрольні питання	40
Список літератури	41

1 ЗМЕНШЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ МЕТОДОМ РОЗСПІВАННЯ

1.1 Загальні положення і терміни

Будь-яким виробництвом в результаті діяльності викидаються забруднюючі речовини (гази, пари, пил), які надходять в атмосферне повітря.

Забруднююча речовина – це речовина хімічного або біологічного походження, що присутня або надходить в атмосферне повітря і може прямо або опосередковано негативно впливати на здоров'я людини та стан навколишнього природного середовища [1].

Санітарно-гігієнічним нормативом якості атмосферного повітря є гранично допустима концентрація (ГДК) забруднюючої речовини в атмосферному повітрі населених місць. ГДК встановлюється на основі тривалих досліджень, норматив діє на всій території країни та затверджується головним державним санітарним лікарем України.

ГДК забруднюючої речовини в атмосферному повітрі населених місць – це максимальна концентрація, при дії якої протягом усього життя людини не виникає прямого або опосередкованого несприятливого впливу на теперішнє і майбутнє покоління, не знижується працездатність людини, не погіршується її самопочуття та санітарно-побутові умови життя.

ГДК вимірюється у міліграмах на кубічний метр ($\text{мг}/\text{м}^3$) [2].

З метою забезпечення екологічної безпеки атмосферного повітря Закон України «Про охорону атмосферного повітря» встановлює **нормативи гранично допустимих викидів (ГДВ)** забруднюючих речовин або суміші таких речовин в атмосферне повітря від стаціонарного джерела викиду.

Для стаціонарних джерел розробляються ГДВ на одиницю маси за одиницю часу або на одиницю продукції чи сировини.

Значення ГДВ у грамах на секунду ($\text{г}/\text{с}$) не повинні перевищуватися у будь-який 20-хвилинний інтервал, прийнятий при встановленні максимальних разових гранично допустимих концентрацій (ГДК_{м.р.}).

Підприємство має право експлуатувати об'єкти, з яких надходять в атмосферне повітря забруднюючі речовини, за

наявності дозволу на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами протягом визначеного в дозволі терміну.

ГДВ встановлюють для кожного джерела забруднення атмосфери за кожною забруднюючою речовиною. Внаслідок підсумовування значень ГДВ окремих джерел забруднення атмосфери встановлюють їх загальні величини для підприємства в цілому.

Гранично допустимий викид шкідливих речовин в атмосферу встановлюється для кожного підприємства за умови, що викиди шкідливих речовин від даного джерела у сукупності з іншими джерелами з визначенням перспективи розвитку не створюють приземну концентрацію шкідливих речовин, яка перевищувала б максимальну разову ГДКм.р. [3].

У відповідності з **Державними санітарними правилами планування та забудови населених пунктів** для підприємств усіх галузей залежно від характеру виробництв і потужності встановлюються санітарно-захисні зони (СЗЗ) [4].

Санітарно-захисна зона – територія, розташована між промисловим підприємством і сільбищною зоною. СЗЗ створюється для захисту населення від впливу несприятливих виробничих факторів (пил, газ, шум, вібрації та ін.), величина яких на межі СЗЗ не повинна перевищувати гігієнічних нормативів, встановлених для населених місць.

Ширина СЗЗ залежить від характеру і потужності виробництва, досконалості технологічних процесів, концентрації шкідливої речовини у викиді, рози вітрів, застосування газо- і пилоочисних пристроїв та інших захисних заходів.

У межах санітарно-захисних зон забороняється будівництво житлових об'єктів, соціальної інфраструктури та інших об'єктів, пов'язаних з постійним перебуванням людей.

Для промислових, комунальних і сільськогосподарських підприємств санітарні норми встановлюють **п'ять класів підприємств** [4, додаток 4]. Розмір СЗЗ визначають залежно від класу підприємства в межах від 50 до 3000 м:

- клас І:
 - Іа – 3000 м;
 - Іб - 1000 м;

- клас II - 500 м;
- клас III - 300 м;
- клас IV - 100 м;
- клас V - 50 м.

Найпоширенішими методами зменшення забруднення атмосфери є:

- розсіювання в атмосфері забруднюючих речовин;
- очищення викидів.

Розсіювання шкідливих викидів і пилу необхідно для створення комфортних санітарно-гігієнічних умов для життєдіяльності людини й дозволяє вирішувати такі інженерно-технічні завдання [5, 6]:

1 Визначення або уточнення ширини СЗЗ. Якщо розрахункова ширина СЗЗ більше за встановлену санітарними нормами, то приймається розрахункова відстань за ширину СЗЗ або рішення про зміну технології виробництва на таку, що дозволить зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу, його перепрофілювання або закриття.

2 Порівнюється розрахована найбільша приземна концентрація шкідливої речовини до та після встановлення різних засобів очищення й інших проектних рішень, що дає можливість оцінити їх ефективність зі створення санітарно-гігієнічних умов.

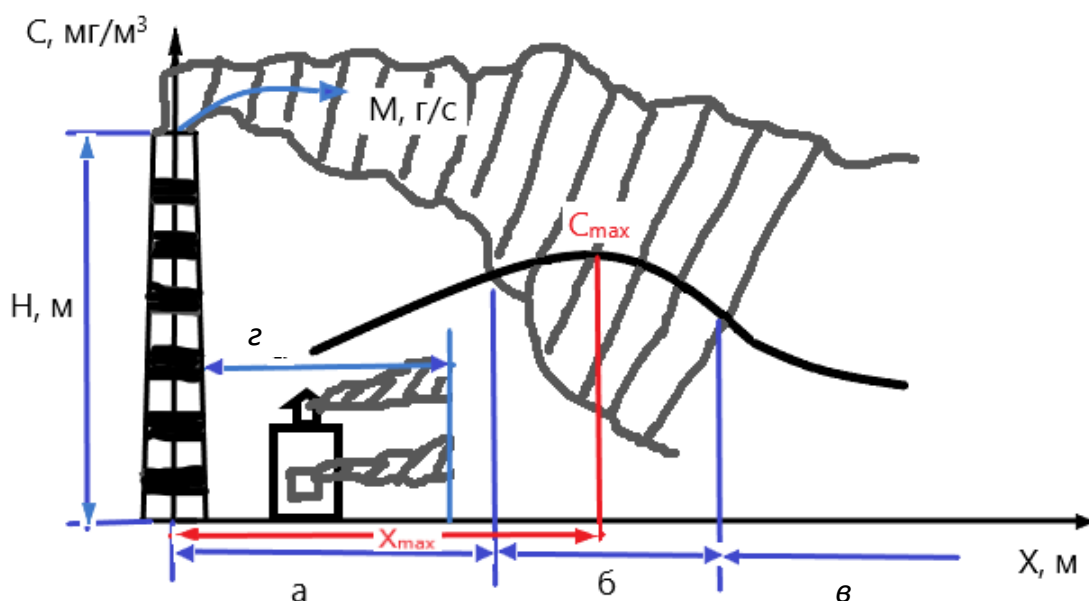
3 Величина максимальної приземної концентрації шкідливих речовин з урахуванням фонові концентрації може бути критерієм скасування будівництва того чи іншого об'єкта. Наприклад, якщо дана концентрація більше за ГДК та іншими профілактичними заходами не може бути знижена.

4 При порівнянні величин приземних концентрацій можна обумовити ефективну висоту викиду.

5 Фонова концентрація встановлюється, а тому уточнюється з урахуванням величин максимальних приземних концентрацій шкідливих речовин новоспоруджених реконструйованих підприємств і рекомендованих заходів профілактики.

На рисунку 1.1 показано розподіл концентрації шкідливих речовин в атмосфері над факелом організованого точкового джерела викиду (труби) [6-8]. З віддаленням від труби в напрямку розповсюдження промислових викидів можна умовно виділити три зони забруднення атмосфери:

- зона перекидання факела викидів, що характеризується відносно невисоким вмістом шкідливих речовин в приземному шарі атмосфери (рисунок 1.1, зона «а»);
- зона задимлення з максимальним вмістом шкідливих речовин (рисунок 1.1, зона «б»). Зона задимлення є найбільш небезпечною для населення і має бути виключена з сельбищної забудови. Розміри цієї зони залежно від метеорологічних умов знаходяться в межах 10...49 висот труби;
- зона поступового зниження рівня забруднення (рисунок 1.1, зона «с»).



a – зона перекидання факела; *б* – зона задимлення; *в* – зона поступового зниження концентрації забруднювача; *z* – зона забруднення неорганізованими джерелами

Рисунок 1.1 – Розподіл концентрації забруднювачів у приземному шарі атмосфери біля факела точкового організованого джерела викиду (труби)

У розрахунках використовують ОНД-86 «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» [6, 9].

Розрахунок базується на законах турбулентної дифузії, які враховують стан атмосфери, розташування підприємства, характер місцевості, фізичні властивості викидів, параметри джерела викиду та ін.

Основними показниками при розрахунку розсіювання шкідливих речовин в атмосфері є:

- величина максимальної приземної концентрації шкідливих речовин C_{\max} ;
- відстань X_{\max} від джерела, на якій досягається максимальна концентрація C_{\max} ;
- величина гранично допустимих викидів ГДВ;
- висота джерела викиду H .

1.2 Розрахунки з розсіювання забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферу організованим точковим джерелом

1.2.1 Розрахунок максимальної приземної концентрації

При розрахунках з розсіювання забруднюючих речовин враховуються температура газів, що викидаються, форма гирла джерела викиду, їхня кількість та ін.

1 Максимальне значення приземної концентрації (у двометровому приземному шарі) шкідливої речовини при викиді газоповітряної суміші з одиночного джерела з круглим гирлом досягається при несприятливих метеорологічних умовах на відстані X_M від джерела і визначається за такими формулами, мг/м³:

а) для гарячого викиду

$$C_{\max} = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}} \cdot 10^3; \quad (1.1)$$

б) холодного викиду

$$C_{\max} = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot n \cdot \eta}{H \cdot \sqrt[3]{H}} \cdot 10^3, \quad (1.2)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від стратифікації атмосфери, для України $A = 160$;

M – маса шкідливої речовини, яка викидається в атмосферу за одиницю часу, г/с;

F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосферному повітрі. Для газуватих шкідливих речовин і дрібнодисперсних аерозолів $F = 1$;

m, n – коефіцієнти, які враховують умови виходу газоповітряної суміші з гирла джерела викиду, розраховуються залежно від параметрів f, V_m, V'_m, f_e . Для холодних викидів $m = 1$;

η – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості (якщо місцевість рівна, то $\eta = 1$);

H – висота джерела викиду, м;

V_1 – витрата газоповітряної суміші, м³/с;

ΔT – різниця між температурою газоповітряної суміші, що викидається, T_r і температурою навколишнього атмосферного повітря T_n , якщо $\Delta T > 20^\circ C$ – «гаряче» джерело, якщо $\Delta T \leq 20^\circ C$ – «холодне» джерело;

10^3 - множник, що враховує перехід від одиниць вимірювання маси в ГДВ до одиниць вимірювання маси в концентрації.

2 Витрата газоповітряної суміші визначається за формулою, м³/с,

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_0, \quad (1.3)$$

де D – діаметр гирла джерела викиду, м;

w_0 – середня швидкість виходу газоповітряної суміші з гирла джерела викиду, м/с.

3 Коефіцієнт m розраховують для гарячого викиду за формулою

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}}, \quad (1.4)$$

де параметр f складає

$$f = \frac{1000 \cdot w_0 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T}. \quad (1.5)$$

4 Параметр V_m обчислюють:

а) для гарячого викиду

$$V_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}}; \quad (1.6)$$

б) холодного викиду

$$V_m = \frac{1,3 \cdot w_0 \cdot D}{H}. \quad (1.7)$$

5 Коефіцієнт n визначається залежно від параметра V_m :

а) якщо $V_m \leq 0,3$, то $n = 3$;

б) якщо $0,3 < V_m \leq 2$, то $n = \sqrt{(V_m - 0,3) \cdot (4,36 - V_m)}$; (1.8)

в) якщо $V_m > 2$, то $n = 1$.

1.2.2 Розрахунок відстані від джерела викиду, на якій створюється максимальна приземна концентрація шкідливої речовини

Відстань X_M від джерела викиду, на якій приземна концентрація при несприятливих метеорологічних умовах досягає максимального значення C_M (при $F < 2$), визначається за формулою, м,

$$X_M = d \cdot H, \quad (1.9)$$

де d – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від параметрів V_m та f , розраховується так:

1) якщо $V_m \leq 2$:

а) для гарячих викидів

$$d = 4,95 \cdot V_m \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}); \quad (1.10)$$

б) холодних викидів

$$d = 11,4 \cdot V_m; \quad (1.11)$$

2) якщо $V_m > 2$:

а) для гарячих викидів

$$d = 7 \cdot V_m \cdot \sqrt{V_m} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}); \quad (1.12)$$

б) холодних викидів

$$d = 16,1 \cdot \sqrt{V_m}. \quad (1.13)$$

1.2.3 Встановлення гранично допустимих викидів

Гранично допустимий викид розраховують за такими формулами, г/с:

а) для гарячого викиду

$$\text{ГДВ} = \frac{(C_{\text{ГДК}} - C_{\text{ф}}) \cdot H^2}{A \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta} \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T} \cdot 10^{-3}, \quad (1.14)$$

де $C_{\text{ГДК}}$ – гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі, мг/м³;

$C_{\text{ф}}$ – фонові концентрації забруднюючої речовини, мг/м³;

10^{-3} - множник, що враховує перехід від нормативної одиниці вимірювання маси в концентрації до одиниць вимірювання маси в ГДВ;

б) холодного викиду

$$\text{ГДВ} = \frac{(C_{\text{ГДК}} - C_{\text{ф}}) \cdot H^3}{A \cdot F \cdot n \cdot \eta} \cdot \frac{8 \cdot V_1}{D} \cdot 10^{-3}. \quad (1.15)$$

Завдання

Завдання 1. Для холодних промислових викидів з одиночного джерела з круглим гирлом забруднення розрахувати максимальну приземну концентрацію шкідливої речовини; відстань від джерела викиду, на якій створюється максимальна приземна концентрація, і ГДВ. Зробити висновок.

Завдання 2. Для гарячих промислових викидів з одиночного джерела забруднення розрахувати максимальну приземну концентрацію шкідливої речовини; відстань від джерела викиду, на якій створюється максимальна приземна концентрація, і ГДВ. Зробити висновок.

Варіант вихідних даних для розрахунків прийняти за таблицею 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані для розрахунку

Вихідна величина	Варіант						
	1	2	3	4	5	6	7
Загальні характеристики викидів							
Маса шкідливої речовини, що викидається, M , г/с	10	11	12	13	14	15	10
Висота джерела викиду H , м	15	16	19	18	20	21	17
Діаметр гирла джерела викиду D , м	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,0
Середня швидкість виходу газоповітряної суміші з гирла джерела викиду w_0 , м/с	10	11	12	15	20	25	15
Фонові концентрації забруднюючої речовини, мг/м ³	0,01	0,03	0,04	0,01	0,00	0,02	0,01
Шкідлива речовина	Хлор	Аміак	Ацетон	Ксилол	Сірководень	Нітроген діоксид	Аміак
ГДК, мг/м ³	0,03	0,2	0,35	0,2	0,001	0,085	0,2
Для гарячих викидів							
Температура газоповітряної суміші, °С	40	45	50	55	60	65	50
Температура навколишнього атмосферного повітря, °С	18	20	22	24	22	20	20

Контрольні питання

- 1 Що таке забруднююча речовина?
- 2 Що таке ГДК забруднюючої речовини у повітрі населених місць?
- 3 Який норматив екологічної безпеки атмосферного повітря ви знаєте?

4 Що таке СЗЗ? Які об'єкти, пов'язані з постійним перебуванням людей дозволяється будувати в СЗЗ?

5 Скільки класів підприємств ви знаєте? Яка ширина СЗЗ для них встановлена?

6 Які інженерно-технічні завдання вирішує розсіювання шкідливих викидів?

7 Назвіть основні показники при розрахунку розсіювання шкідливих речовин.

2 РОЗРАХУНОК ЕКОЛОГІЧНОГО ПОДАТКУ ЗА ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ОДИНОЧНИМ ДЖЕРЕЛОМ, З ЯКОГО ВИКИДАЄТЬСЯ СУМІШ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ПОСТІЙНОГО СКЛАДУ

2.1 Загальні відомості

Відомо, що гранично допустимий викид ГДВ встановлюють для кожного джерела забруднення атмосфери за кожною забруднюючою речовиною.

Для одиночного джерела, з якого викидається суміш постійного складу шкідливих речовин із сумарною шкідливою дією, визначається допоміжна величина – сумарний ГДВ_с, що відповідає одній з речовин.

Для цього у формулах (1.14), (1.15) потрібно використати ГДК цієї шкідливої речовини та сумарний фон C_{ϕ} , наведений для цієї ж шкідливої речовини.

Після цього з урахуванням складу викидів визначаються ГДВ окремих шкідливих речовин за формулами (1.14), (1.15) [5, 6, 10].

За викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення в межах ліміту (ГДВ) всі суб'єкти господарювання сплачують *екологічний податок*. Сума податку, який стягується за викиди в атмосферне повітря забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення, розраховується виходячи з кількості джерел забруднення, виду забруднюючої речовини, обсягу викидів, ставки податку за тону забруднюючої речовини. Ставки екологічного податку встановлені статтями 243–248 Податкового кодексу України і

постійно оновлюються, тому при розрахунках рекомендовано звертатися безпосередньо до Податкового кодексу [11].

Ставки податку за викиди в атмосферне повітря окремих забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Ставки податку за викиди в атмосферне повітря окремих забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення

Найменування забруднюючої речовини	Ставка податку, грн/т
Азоту оксиди	2451,84
Аміак	459,85
Ангідрид сірчистий	2451,84
Ацетон	919,69
Бенз(о)пірен	3121217,74
Бутилацетат	552,23
Ванадію п'ятиокис	9196,93
Водень хлористий	92,37
Вуглецю окис	92,37
Вуглеводні	138,57
Газоподібні фтористі сполуки	6070,39
Тверді речовини	92,37
Кадмію сполуки	19405,92
Марганець та його сполуки	19405,92
Нікель та його сполуки	98872,97
Озон	2451,84
Ртуть та її сполуки	103931,28
Свинець та його сполуки	103931,28
Сірководень	7879,65
Сірковуглець	5120,56
Спирт н-бутиловий	2451,84
Стирол	17903,89
Фенол	11128,67
Формальдегід	6070,39
Хром та його сполуки	65822,27

Ставки податку за викиди в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення забруднюючих речовин (сполук), які не увійшли до таблиці 2.1 та на які встановлено клас небезпечності, наведено в таблиці 2.2.

Клас небезпечності речовини та її ГДК визначаємо за таблицею 2.3.

Таблиця 2.2 – Ставка екологічного податку для забруднюючих атмосферне повітря речовин залежно від класу їх небезпечності

Клас небезпечності	Ставка податку, гривень за 1 т
I	17536,42
II	4016,11
III	598,4
IV	138,57

Таблиця 2.3 – Клас небезпечності та ГДК хімічних речовин в атмосферному повітрі населених місць [2]

Речовина	ГДК, мг/м³	Клас
Аміак	0,04	IV
Етен	3	III
Карбон (II) оксид	3,0	IV
Нітроген (II) оксид	0,06	III
Нітроген (IV) оксид	0,04	II
Сажа	0,05	III
Стронцій оксид	1	II
Фенол	0,03	II
Формальдегід	0,03	II
Цинк оксид	0,5	III
Хром (IV) оксид	0,0015	I
Хлор	0,03	II

Ставка податку за викиди двоокису вуглецю (карбон (II) оксиду, CO₂) становить 10,00 грн за 1 т.

Суми податку обчислюються за податковий (звітний) квартал платниками податку. У разі якщо під час провадження господарської діяльності платником податку здійснюються викиди різних забруднюючих речовин, такий платник зобов'язаний визначати суму податку окремо за кожним видом забруднюючої речовини.

Сума податку, який стягується за викиди в атмосферне повітря забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення, грн/р., складає

$$P_{\text{вс}} = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot H_{\text{пi}}), \quad (2.1)$$

де M_i - обсяг викиду i -ї забруднюючої речовини, т (дорівнює масі шкідливої речовини, т, що викидається за рік);

$H_{\text{пi}}$ - ставки податку в поточному році за тону забруднюючої речовини, грн, к. (таблиці 2.1-2.3).

Приклад

Розрахувати гранично допустимі викиди в атмосферу з одиночного джерела нагрітих і холодних газоповітряних сумішей шкідливих речовин (одні й ті самі речовини містяться в обох викидах). Обчислити екологічний податок, що має сплатити підприємство за забруднення атмосферного повітря.

Вихідні дані. Найменування шкідливих речовин, що містяться у викидах в атмосферу: карбон (II) оксид, нітроген (II) оксид, сажа. Гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі: $C_{\text{ГДК}(\text{CO})} = 3 \text{ мг/м}^3$, $C_{\text{ГДК}(\text{NO})} = 0,6 \text{ мг/м}^3$, $C_{\text{ГДК}(\text{C})} = 0,15 \text{ мг/м}^3$. Фонова концентрація забруднюючої речовини: $C_{\text{ф}(\text{CO})} = 0,3 \text{ мг/м}^3$, $C_{\text{ф}(\text{NO})} = 0,06 \text{ мг/м}^3$, $C_{\text{ф}(\text{C})} = 0,015 \text{ мг/м}^3$. Витрата газоповітряної суміші $V_1 = 1,0, \text{ м}^3/\text{с}$. Діаметр гирла джерела викиду $D = 0,4 \text{ м}$. Висота джерела викиду $H = 24 \text{ м}$. Коефіцієнт, що залежить від стратифікації атмосфери, для України $A = 160$. Різниця між температурою газоповітряної суміші, що викидається, і температурою навколишнього атмосферного повітря (для гарячих викидів) $\Delta T = 210^\circ\text{C}$. Коефіцієнти $m = 0,47$, $n = 1$. Коефіцієнт, який враховує вплив рельєфу місцевості, $\eta = 1$.

Розв'язання

1 За формулою (1.14) розраховуємо ГДВ гарячої газоповітряної суміші в атмосферу для кожної шкідливої речовини, що міститься у викиді (ГДК шкідливої речовини обрати за таблицю 2.3):

а) для карбон (II) оксиду

$$\text{ГДВ}_{\text{CO}_r} = \frac{(3,0-0,3) \cdot 24^2}{160 \cdot 1 \cdot 0,47 \cdot 1 \cdot 1} \cdot \sqrt[3]{1,0 \cdot 210} \cdot 10^{-3} = 0,122 \text{ г/с};$$

б) нітроген (II) оксиду

$$\text{ГДВ}_{\text{NO}_r} = \frac{(0,6-0,06) \cdot 24^2}{160 \cdot 1 \cdot 0,47 \cdot 1 \cdot 1} \cdot \sqrt[3]{1,0 \cdot 210} \cdot 10^{-3} = 0,025 \text{ г/с};$$

в) сажі

$$\text{ГДВ}_{\text{C}_r} = \frac{(0,15-0,015) \cdot 24^2}{160 \cdot 1 \cdot 0,47 \cdot 1 \cdot 1} \cdot \sqrt[3]{1,0 \cdot 210} \cdot 10^{-3} = 0,006 \text{ г/с}.$$

2 За формулою (1.15) обчислюємо ГДВ холодної газоповітряної суміші в атмосферу для кожної шкідливої речовини, що міститься у викиді:

а) для карбон (II) оксиду

$$\text{ГДВ}_{\text{CO}_x} = \frac{(3,0-0,3) \cdot 24^{\frac{4}{3}}}{160 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} \cdot \frac{8 \cdot 1}{0,4} \cdot 10^{-3} = 0,023 \text{ г/с};$$

б) нітроген (II) оксиду

$$\text{ГДВ}_{\text{NO}_x} = \frac{(0,6-0,06) \cdot 24^{\frac{4}{3}}}{160 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} \cdot \frac{8 \cdot 1}{0,4} \cdot 10^{-3} = 0,005 \text{ г/с};$$

в) сажі

$$\text{ГДВ}_{\text{C}_x} = \frac{(0,15-0,015) \cdot 24^{\frac{4}{3}}}{160 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} \cdot \frac{8 \cdot 1}{0,4} \cdot 10^{-3} = 0,001 \text{ г/с}.$$

3 Розраховуємо сумарний ГДВ по кожній шкідливій речовині, що міститься у гарячих і холодних викидах в атмосферне повітря, г/с:

а) для карбон (II) оксиду

$$\text{ГДВ}_{\text{CO}_c} = 0,122 + 0,023 = 0,145 \text{ г/с,}$$

у тоннах на рік

$$\text{ГДВ}_{\text{CO}_c} = 0,145 \cdot \frac{3600 \cdot 24 \cdot 365}{10^6} = 4,57 \text{ т/р.};$$

б) нітроген (II) оксиду

$$\text{ГДВ}_{\text{NO}_c} = 0,025 + 0,005 = 0,030 \text{ г/с,}$$

у тоннах на рік

$$\text{ГДВ}_{\text{NO}_c} = 0,030 \cdot \frac{3600 \cdot 24 \cdot 365}{10^6} = 0,95 \text{ т/р.};$$

в) сажі

$$\text{ГДВ}_{\text{C}_c} = 0,006 + 0,001 = 0,007 \text{ г/с,}$$

у тоннах на рік

$$\text{ГДВ}_{\text{C}_c} = 0,007 \cdot \frac{3600 \cdot 24 \cdot 365}{10^6} = 0,22 \text{ т/р.}$$

4 Визначаємо суму екологічного податку для кожної шкідливої речовини у гарячому і холодному викидах за формулою (2.1), грн, к.:

а) за викиди карбон (II) оксиду

$$\text{П}_{\text{VCO}} = 4,57 \cdot 92,37 = 422 \text{ грн. 13 коп.};$$

б) нітроген (II) оксиду

$$\text{П}_{\text{VNO}} = 0,95 \cdot 2451,84 = 2329 \text{ грн 25 коп.};$$

в) сажі

$$\text{П}_{\text{VC}} = 0,22 \cdot 598,4 = 131 \text{ грн. 70 коп.}$$

Сума екологічного податку за викиди всіх шкідливих речовин, грн, к., складе

$$\begin{aligned}\sum P_{\text{вс}} &= 422\text{грн. 13 коп.} + 2329\text{грн 25 коп} + 131\text{грн. 70 коп.} = \\ &= 2883\text{грн. 08коп.}\end{aligned}$$

Висновок: розраховано ГДВ шкідливих речовин, що містяться у гарячих викидах. Для карбон (II) оксиду ГДВ_г становить 0,122 г/с, нітроген (II) оксиду – 0,025 г/с, сажі – 0,006 г/с. Встановлено ГДВ шкідливих речовин, що містяться у холодних викидах. Для карбон (II) оксиду ГДВ_х становить 0,023 г/с, нітроген (II) оксиду – 0,005 г/с, сажі – 0,001 г/с. Обчислено сумарний ГДВ за кожною шкідливою речовиною, що міститься у викидах. Для карбон (II) оксиду ГДВ складає 0,145 г/с, нітроген (II) оксиду – 0,03 г/с, сажі – 0,007 г/с.

Екологічний податок, що сплатить підприємство за забруднення атмосферного повітря монооксидом вуглецю, – 422грн 13 коп., нітроген (II) оксидом – 2329грн 25 коп., сажею - 131грн 70 коп. Загальна сума екологічного податку за забруднення атмосферного повітря стаціонарними джерелами викидів дорівнює 2883грн 08коп.

Завдання

Розрахувати гранично допустимі викиди в атмосферу з одиночного джерела нагрітих і холодних газоповітряних сумішей шкідливих речовин (одні й ті самі речовини містяться в обох викидах). Обчислити суми екологічного податку по кожній речовині і загальну суму екологічного податку на рік. Зробити висновок.

За таблицею 2.4 обрати варіант вихідних даних та прийняти найменування шкідливих речовин, що містяться у викидах в атмосферу, фонову концентрацію забруднюючої речовини, витрату газоповітряної суміші, діаметр гирла джерела викиду, висоту джерела викиду.

Прийняти інші дані для розрахунків:

- коефіцієнт, що залежить від стратифікації атмосфери, для України $A = 160$;

- безрозмірний коефіцієнт, який враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосферному повітрі, $F = 1$;

- різниця між температурою газоповітряної суміші, що викидається, і температурою навколишнього атмосферного повітря (для гарячих викидів) $\Delta T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$;

- коефіцієнти, які враховують умови виходу газів із джерела викиду, $m = 0,5$, $n = 1$;

- коефіцієнт, який враховує вплив рельєфу місцевості, $\eta = 1$.

Таблиця 2.4 – Варіанти вихідних даних для розрахунку

Варіант	Шкідливі речовини у викидах	Фонова концентрація C_f , мг/м ³	Висота труби, м	Діаметр гирла труби, м	Витрата газоповітряної суміші, м ³ /с
1	Карбон (II) оксид CO	0,3	20	0,5	0,9
	Нітроген (IV) оксид NO ₂	0,009			
	Сажа С	0,01			
2	Етен	0,9	21	0,6	0,8
	Цинк оксид ZnO	0,05			
	Аміак NH ₃	0,006			
3	Хром (VI) оксид CrO ₃	0,00003	22	0,7	1,1
	Нітроген (II) оксид NO	0,008			
	Сажа С	0,005			
4	Карбон (II) оксид CO	0,05	23	0,8	1,2
	Нітроген (IV) оксид NO ₂	0,004			
	Хлор Cl ₂	0,008			
5	Формальдегід	0,005	24	0,7	1,0
	Стронцій оксид SrO	0,06			
	Сажа С	0,002			
	Нітроген (II) оксид NO	0,007			
6	Нітроген (IV) оксид NO ₂	0,01	25	0,6	0,9
	Аміак NH ₃	0,009			
	Фенол	0,001			
7	Хлор Cl ₂	0,01	19	0,8	1,1
	Сажа С	0,003			
	Нітроген (IV) оксид NO ₂	0,005			

Контрольні питання

1 Для скількох джерел забруднення атмосфери та забруднюючих речовин, якими володіє суб'єкт господарювання, встановлюють ГДВ?

2 Який правовий документ встановлює ставки екологічного податку?

3 Чим визначається сума екологічного податку за забруднення атмосферного повітря стаціонарними джерелами забруднення?

4 Як визначається ставка екологічного податку за забруднення атмосферного повітря стаціонарними джерелами забруднення?

3 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЦИКЛОНА

3.1 Загальні відомості

До апаратів сухого інерційного очищення газів від пилу належать пилоосадкові камери, жалюзійні апарати, ротаційні пиловловлювачі, циклони поодинокі та об'єднані в групи, прямоточні, батарейні. Їх основною перевагою є простота конструкції. Ефективність очищення газів від пилу в таких апаратах часто є недостатньою, тому їх переважно застосовують для первинного очищення газів від пилу [7].

Серед апаратів сухого інерційного очищення газів найбільш широко застосовуються циклони, тому що ці апарати мають відносно високу ефективність вловлювання частинок пилу при помірних значеннях гідравлічного опору в апараті.

Циклон складається з двох частин: циліндричної труби і конуса, що звужується донизу (рисунок 3.1). Газ, що ввійшов, по спіралі рухається всередині апарата. Під дією відцентрової сили зважені частинки відкидаються до стінок циклона і, втрачаючи швидкість, опускаються до конічної частини, а очищене повітря виходить через вивідний патрубок. Чим більше швидкість газу в циклоні, тим більше його ефективність і менше габарити. Але зі збільшенням швидкості зростає і гідравлічний опір. Циклони, що

випускаються промисловістю, розраховані на швидкість газового потоку на вході від 5 до 20 м/с.

Для розрахунку або вибору циклонів необхідні такі дані [7]:

- об'ємна витрата газів, що підлягають очищенню при робочих умовах, $Q_p, \text{ м}^3/\text{с}$;
- динамічна в'язкість газів за робочої температури $\mu_r, \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- густина газу в робочих умовах $\rho_r, \text{ кг}/\text{м}^3$;
- дисперсний склад пилу, що задається параметрами d_m , мкм, і $lg\sigma_q$;
- концентрація пилу в газах на вході в апарат $C_{вх}, \text{ г}/\text{м}^3$;
- густина частинок пилу $\rho_q, \text{ кг}/\text{м}^3$;
- необхідний ступінь (ефективність) очищення, $\eta_T = 85 \%$.

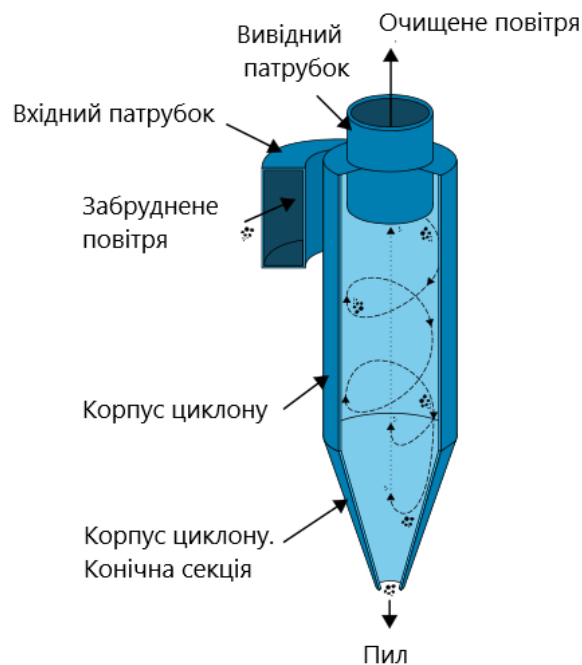


Рисунок 3.1 – Схема циклона [12]

3.2 Методика розрахунку одиночного циклона типу ЦН

1 За типом циклона визначаємо оптимальну швидкість газу в апараті $\omega_{\text{опт}}$ (таблиця 3.1) [7, 13, 14].

2 Розраховуємо необхідну площу перерізу циклона, м^2 ,

$$F = \frac{Q_p}{\omega_{\text{опт}}}. \quad (3.1)$$

Таблиця 3.1 – Параметри, що визначають ефективність циклонів типу ЦН

Тип циклона	d_{50}^T , МКМ	σ_{η}^T	$\omega_{\text{опт}}$, М/С
ЦН-24	8,50	0,308	4,5
ЦН-15У	6,00	0,283	3,5
ЦН-15	4,50	0,352	3,5
ЦН-11	3,65	0,352	3,5

3 Визначаємо діаметр циклона, м,

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785}} \quad (3.2)$$

Діаметр циклона округляємо до значення, яке рекомендовано стандартним рядом діаметрів:

$D' = 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800$ мм.

Величину стандартного діаметра циклона D' переводимо в метри.

4 Обчислюємо дійсну швидкість газу в циклоні, м/с,

$$\omega = \frac{Q_p}{0,785 \cdot D'^2} \quad (3.3)$$

Порівнюємо дійсну швидкість газу в циклоні з оптимальною (таблиця 3.1). Дійсна швидкість не повинна відхилятися від оптимальної більше, ніж на 15 %.

5 Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного опору одиночного циклона

$$\zeta = K_1 \cdot K_2 \cdot \zeta_{500} + K_3, \quad (4)$$

де K_1 – виправний коефіцієнт на вплив діаметра циклона (таблиця 3.2);

K_2 – виправний коефіцієнт на запиленість газу (таблиця 3.3);

ζ_{500} – виправний коефіцієнт на запиленість газу для циклона, який працює у гідравлічній мережі без додаткових пристроїв (таблиця 3.4);

K_3 – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, пов’язані з компонуванням циклонів у групу, для одиночного циклона $K_3 = 0$.

Таблиця 3.2 – Виправний коефіцієнт на вплив діаметра циклона

Діаметр циклона, мм	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24
150	0,94	0,85
200	0,95	0,90
300	0,93	0,93
450	1,0	1,0
500	1,0	1,0

При діаметрі циклона більше 500 мм виправний коефіцієнт $K_1 = 1,0$.

Таблиця 3.3 – Виправний коефіцієнт на запиленість газу ($D = 500$ мм)

Тип циклона	Виправний коефіцієнт при концентрації пилю, 10^{-3} кг/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86

Таблиця 3.4 - Коефіцієнт гідравлічного опору одиночного циклона діаметром 500 мм

Коефіцієнт гідравлічного опору	Тип циклона			
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24
ζ_{500}	245	155	165	75

6 Визначаємо втрати тиску в циклоні, Па,

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot \omega^2}{2}. \quad (3.5)$$

7 Розраховуємо медіанний діаметр частинок пилу за робочих умов, м,

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D'}{D_T} \cdot \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_T} \cdot \frac{\mu_T}{\mu_T} \cdot \frac{\omega_{\text{опт}}}{\omega}}, \quad (3.6)$$

де d_{50}^T – медіанний діаметр частинок пилу, при якому за стандартних умов частка частинок пилу розміром більше і менше d_{50}^T є рівною, м (таблиця 3.1);

D_T – діаметр циклона за стандартних умов, $D_T = 0,6$ м;

ρ_T – густина частинок за стандартних умов, $\rho_T = 1930$ кг/м³;

μ_T – динамічна в'язкість газу за стандартних умов,

$\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

8 Знаходимо параметр x

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{50}}}{\sqrt{(\lg \sigma_{\eta}^T)^2 + (\lg \sigma_{\text{ч}})^2}}, \quad (3.7)$$

де $\lg \sigma_{\eta}^T$ - стандартне відхилення у функції розподілу парціальних коефіцієнтів очищення (таблиця 3.1);

$\lg \sigma_{\text{ч}}$ - відхилення у функції розподілу парціальних коефіцієнтів очищення за даних умов.

9 За таблицею 3.5 визначаємо коефіцієнт повного очищення газу $\Phi(x)$ у частках одиниці та розраховуємо ступінь очищення газів від пилу в циклоні, %,

$$\eta_p = \Phi(x) \cdot 100. \quad (3.8)$$

10 Розрахункове значення ступеня очищення η_p , %, порівнюємо з необхідним ступенем очищення η_t . Якщо η_p виявиться меншим за потрібний, то обираємо інший тип циклона з більшим коефіцієнтом гідравлічного опору.

Таблиця 3.5 – Значення нормальної функції розподілу

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,00	0,5000	0,54	0,7054	1,08	0,8599	1,62	0,9474
0,02	0,5080	0,56	0,7123	1,10	0,8643	1,64	0,9495
0,04	0,5160	0,58	0,7190	1,12	0,8686	1,66	0,9515
0,06	0,5239	0,60	0,7257	1,14	0,8729	1,68	0,9535
0,08	0,5319	0,62	0,7324	1,16	0,8770	1,70	0,9554
0,10	0,5398	0,64	0,7389	1,18	0,8810	1,72	0,9573
0,12	0,5478	0,66	0,7454	1,20	0,8849	1,74	0,9591
0,14	0,5557	0,68	0,7517	1,22	0,8888	1,76	0,9608
0,16	0,5636	0,70	0,7580	1,24	0,8925	1,78	0,9625
0,18	0,5714	0,72	0,7642	1,26	0,8962	1,80	0,9641
0,20	0,5793	0,74	0,7703	1,28	0,8997	1,82	0,9656
0,22	0,5871	0,76	0,7764	1,30	0,9032	1,84	0,9671
0,24	0,5948	0,78	0,7823	1,32	0,9066	1,86	0,9686
0,26	0,6026	0,80	0,7881	1,34	0,9099	1,88	0,9699
0,28	0,6103	0,82	0,7939	1,36	0,9131	1,90	0,9713
0,30	0,6179	0,84	0,7995	1,38	0,9162	1,92	0,9726
0,32	0,6255	0,86	0,8051	1,40	0,9192	1,94	0,9738
0,34	0,6331	0,88	0,8106	1,42	0,9222	1,96	0,9750
0,36	0,6406	0,90	0,8159	1,44	0,9251	1,98	0,9761
0,38	0,6480	0,92	0,8212	1,46	0,9279	2,00	0,9772
0,40	0,6554	0,94	0,8264	1,48	0,9306	2,10	0,9821
0,42	0,6628	0,96	0,8315	1,50	0,9332	2,20	0,9861
0,44	0,6700	0,98	0,8365	1,52	0,9357	2,30	0,9893
0,46	0,6772	1,00	0,8413	1,54	0,9382	2,40	0,9918
0,48	0,6844	1,02	0,8461	1,56	0,9406	2,50	0,9938
0,50	0,6915	1,04	0,8508	1,58	0,9429	2,60	0,9953
0,52	0,6985	1,06	0,8554	1,60	0,9452	2,70	0,9965

Завдання

Розрахувати параметри очищення газів від пилу в циклоні типу ЦН. Порівняти розрахований ступінь очищення з необхідним ступенем очищення η_T . Зробити висновок. Вихідні дані для розрахунку прийняти за таблицею 3.6.

Контрольні питання

- 1 Назвіть апарати сухого інерційного очищення газів від пилу.
- 2 Назвіть складові циклона.
- 3 Опишіть принцип роботи циклона.
- 4 Від чого залежить ефективність роботи циклона?

Таблиця 3.6. – Вихідні дані для розрахунку

Вихідна величина	Варіант						
	1	2	3	4	5	6	7
Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15
Об'ємна витрата газів $Q_p, \text{м}^3/\text{ГОД}$	8000	7500	7000	5000	6000	7000	8000
Динамічна в'язкість газів $\mu_g, 10^{-6} \text{Па}\cdot\text{с}$	22,0	22,0	23,5	22,5	21,5	18,0	17,3
Густина газу $\rho_g, \text{кг}/\text{м}^3$	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3
Дисперсний склад пилу, що задається параметрами: - $d_m, \text{мкм}$ - $\lg\sigma_{\text{ч}}$	40 0,5	35 0,6	40 0,7	45 0,5	35 0,6	45 0,7	52 0,5
Концентрація пилу $C_{\text{вх}}, \text{г}/\text{м}^3$	20	15	22	12	18	25	32
Густина частинок пилу $\rho_{\text{ч}}, \text{кг}/\text{м}^3$	800	900	1000	1200	1300	15001	1100

4 РОЗРАХУНОК АДСОРБЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ

4.1 Загальні відомості

Адсорбція – поглинання і концентрування газів на поверхні твердих тіл. *Адсорбент* – тверда речовина, на поверхні якої проходить адсорбція. *Адсорбтив* – газ, що вміщується в газовій суміші. *Адсорбат* – газ, поглинений адсорбентом [15].

Залежно від характеру взаємодії між молекулою адсорбату і адсорбентом адсорбцію поділяють на фізичну адсорбцію і хемосорбцію:

- фізична адсорбція обумовлюється силами міжмолекулярної взаємодії;

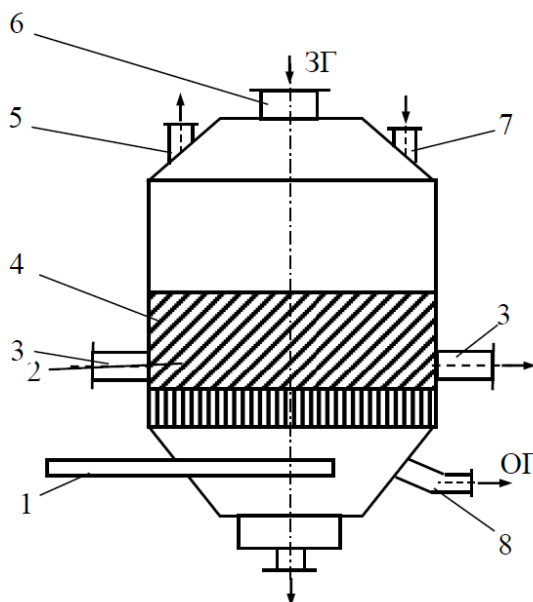
- при хемосорбції молекули адсорбату і адсорбенту утворюють хімічні сполуки.

При адсорбційному очищенні повітря від шкідливих газів одним з основних завдань є регенерація адсорбенту або його рекуперація. Для цього необхідно, щоб у вибраному адсорбційному середовищі переважав процес фізичної адсорбції [7, 15, 16].

Адсорбер – установка, в якій відбувається адсорбція. Адсорбери застосовують для очищення викидів від пари летких органічних сполук та інших газів. Існують адсорбери періодичної та безперервної дії. В промисловості зазвичай застосовують установки безперервної дії. Вони складаються з двох і більше адсорберів, які по чергово вмикаються для адсорбції газів. Після насичення адсорбенту в першому адсорбері подачу газу перемикають на другий, а в першому в цей час проводять десорбцію, сушіння й охолодження, після чого його перемикають на цикл поглинання, а другий адсорбер – на десорбцію, сушіння й охолодження.

Принцип роботи адсорбера періодичної дії (рисунок 4.1): газова суміш, що очищається, якого-небудь газу-забруднювача надходить через патрубок 1 в адсорбер, проходить через шар пористого адсорбенту 2, який насипано на горизонтальну решітку 3, і видаляється з апарата через патрубок 4. Насичення адсорбенту визначається початком проскакування компонента, що поглинається, після чого проводиться десорбція. Шар адсорбенту

прогрівається парою, яка надходить через патрубок 5. При цьому з адсорбенту відганяються пари витягнутих речовин, що відводяться через патрубок 6 на конденсацію і наступну переробку. Потім адсорбент сушать гарячою парою і після охолодження повторюють цикл процесу [15].



1 – штуцер для відведення конденсату; 2 – решітка; 3 – люки для вивантаження адсорбенту; 4 – адсорбент; 5 – штуцер для відведення парів при десорбції; 6 – патрубок для підведення забрудненого газу; 7 – люк для завантаження адсорбенту; 8 – штуцер для відведення очищеного газу та повітря під час регенерації

Рисунок 4.1 - Адсорбер періодичної дії

Поширеними промисловими адсорбентами для очищення газів є активоване вугілля, силікагелі, цеоліти, глинисті матеріали, пористе скло тощо. Адсорбенти мають велику площу поверхні на одиницю маси. Одним з основних параметрів при виборі адсорбенту є адсорбційна здатність до компонента, який вилучається.

Адсорбційна здатність - маса речовини, яка поглинається одиницею маси адсорбенту в довільний момент часу. Залежить від концентрації адсорбованої речовини (парціального тиску) біля поверхні адсорбенту, загальної площі цієї поверхні, фізичних, хімічних та електричних властивостей адсорбованої речовини й адсорбенту, температурних умов ті наявності інших домішок.

Інженерно-технічні розрахунки адсорбційного методу очищення повітря від газів засновані на кривих, які називають ізотермами адсорбції.

Ізотерма адсорбції – крива залежності кількості адсорбованої речовини від рівноважного тиску (або концентрації) за постійної температури.

Ізотерма адсорбції певного газового адсорбтиву – це функція, у якій кількість речовини, адсорбованої при рівновазі, залежить від рівноважного тиску (або концентрації) адсорбтиву в газовій фазі при сталій температурі.

Ізотерми адсорбції відображаються різними кривими. На рисунку 4.2 наведено ізотерму адсорбції Ленгмюра. Вона характерна для газів, адсорбованих твердою поверхнею.

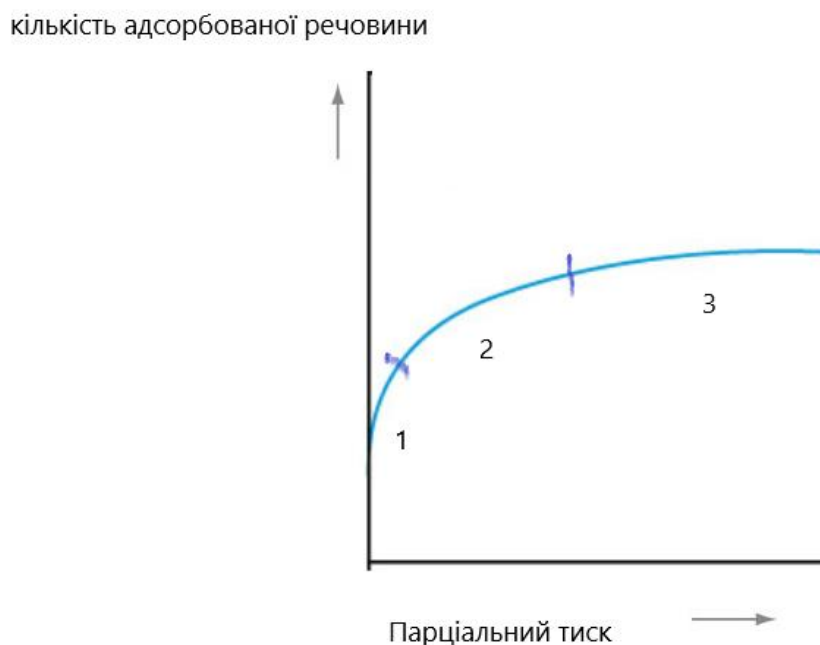


Рисунок 4.2 - Ізотерма адсорбції Ленгмюра

Кількість адсорбованої речовини майже завжди нормується за масою адсорбенту, що дозволяє порівнювати різні матеріали.

У більшості випадків крива ізотерми адсорбції включає три області (рисунок 4.2):

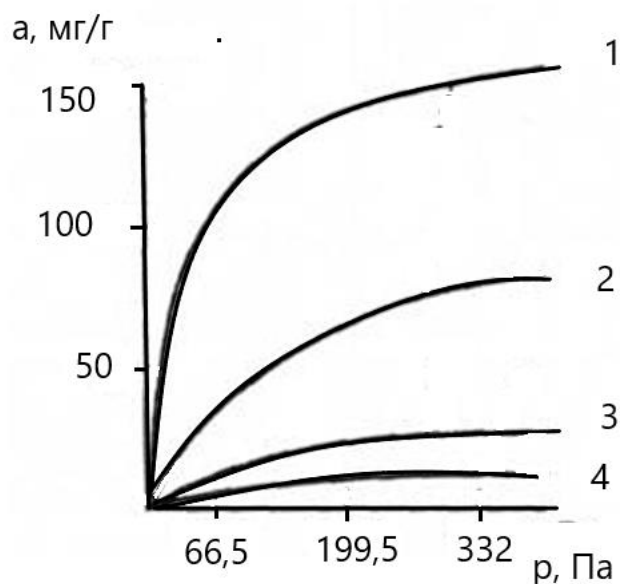
- перша характеризується практично лінійною залежністю поглинальної здатності адсорбенту від концентрації адсорбату в газовій суміші – носії (підпорядковується закону Генрі);

- друга характеризується степеневу залежністю поглинальної здатності адсорбенту від концентрації;

- у третій досягається граничне насичення адсорбенту речовиною, що поглинається, після чого кількість поглиненого адсорбату майже не залежить від його концентрації в газовій суміші.

Промислові процеси адсорбції переважно протікають у перших двох областях внаслідок того, що адсорбцію звичайно використовують для глибокого очищення газів від компонента, що вилучається, а це збільшує час захисної дії та скорочує частоту циклів регенерації адсорбенту.

На рисунку 4.3 зображено ізотерми адсорбції діоксиду сірки SO_2 на активованому вугіллі СТК у діапазоні температур від 20 до 150 °С.



1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 100 °С; 4 – 150 °С
(ордината «а» - маса адсорбованої речовини)

Рисунок 4.3 – Ізотерми адсорбції SO_2 на активованому вугіллі СТК при різних температурах

Бачимо, що зі збільшенням температури зменшується адсорбційна здатність активованого вугілля. На цій властивості адсорбентів ґрунтується процес їхньої регенерації. Регенерацію здійснюють нагріванням адсорбенту до температури вище за робочу або продуванням його водяною парою чи гарячим газом.

4.2 Методика розрахунку адсорбера

Вихідними даними [14] для розрахунку адсорбційної установки є:

- об'ємна витрата очищуваного повітря (газу), м³/с;
- концентрація вилученої домішки, мг/м³;
- тиск відвідних газів, Па.

Розрахунок адсорбційної установки полягає у визначенні:

- потрібної маси адсорбенту;
- конструктивних розмірів;
- гідравлічного опору адсорбенту;
- часу захисної дії.

На першому етапі розрахунку та проектування адсорбера обирають робочу температуру і тип адсорбенту. Для збільшення адсорбційної здатності адсорбенту робочу температуру встановлюють мінімальною.

Вибір адсорбенту здійснюється за ізотермами адсорбції при робочих параметрах температури і концентрації домішки за умов мінімальної маси адсорбенту. Методику розрахунків наведено в роботах [15-17].

Мінімальну необхідну масу адсорбенту, кг, визначають за формулою

$$m_a = \frac{Q_{\Pi} \cdot C_0 \cdot \tau \cdot k_3}{a_{\infty}}, \quad (4.1)$$

де Q_{Π} - об'ємна витрата газоповітряної суміші, м³/с;

C_0 - концентрація вилучених домішок, мг/м³;

τ - час адсорбції, с;

k_3 - коефіцієнт запасу, приймають 1,1-1,2;

a_{∞} - статична поглинальна здатність адсорбенту в робочих умовах, мг/кг.

На основі допустимого падіння тиску в адсорбері розраховуємо швидкість газоповітряного потоку в адсорбері, м/с,

$$\omega_{\Gamma\Pi} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \kappa_{\Phi} \cdot \Delta p \cdot d_{\text{екв}}^3 \cdot \rho_{\text{H}} \cdot Q_{\Pi}}{3 \cdot \zeta_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot (1 - \Pi_{\text{H}}) \cdot m_a}}, \quad (4.2)$$

де ρ_r – густина газу, що поглинається, кг/м³;

k_ϕ - коефіцієнт форми зерна адсорбенту, що враховує неоднакову доступність усієї поверхні зерна потоку газу,

$$k_\phi = 1,5 \cdot d_3 \cdot l_3 \cdot (l_3 + 0,5 \cdot d_3)^{-1} \cdot (1,5 \cdot d_3^2 \cdot l_3)^{-1,3}, \quad (4.3)$$

де d_3 - діаметр зерна, м;

l_3 - довжина зерна, м;

$d_{\text{екв}}$ - еквівалентний діаметр зерна сорбенту,

$$d_{\text{екв}} = \frac{\Pi_H \cdot d_3 \cdot l_3}{(1 - \Pi_H) \cdot (0,5 \cdot d_3 + l_3)}, \quad (4.4)$$

де Π_H - пористість шару адсорбенту,

$$\Pi_H = \frac{(\rho_y - \rho_H)}{\rho_y}, \quad (4.5)$$

де ρ_y - уявна густина сорбенту, кг/м³;

ρ_H - насипна густина сорбенту, кг/м³;

ζ_r - коефіцієнт гідравлічного опору, що визначається залежно від режиму течії газоповітряного потоку:

- якщо число Рейнольдса $Re < 50$, то

$$\zeta_r = \frac{220}{Re}; \quad (4.6)$$

- якщо $50 \leq Re \leq 7200$, то

$$\zeta_r = \frac{11,6}{Re^{0,25}}. \quad (4.7)$$

Число Рейнольдса обчислюють за формулою

$$Re = \frac{\omega_{\text{гп}} \cdot d_{\text{екв}} \cdot \rho_H}{\nu}, \quad (4.8)$$

де ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, обирається виходячи з необхідного часу контакту газу з сорбентом і мінімальних гідравлічних опорів, м²/с.

Розраховуємо геометричні розміри адсорбера за формулами:

а) діаметр, м,

$$D_a = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{II}}{\pi \cdot \omega_{гп} \cdot \Pi_H}}; \quad (4.9)$$

б) довжина, м,

$$L_a = \sqrt{\frac{4 \cdot m_a}{\pi \cdot \rho_H \cdot D_a^2}}. \quad (4.10)$$

Час захисної дії адсорбера визначають за характером кривої ізотерми адсорбції.

Для області ізотерми адсорбції (рисунок 4.2, ділянка 1), в якій діє закон Генрі, тривалість адсорбції обчислюють за формулою, с,

$$\tau_{зд} = \left(L_a \cdot \sqrt{\frac{60 \cdot \Gamma}{\omega_{гп}}} - b \cdot \sqrt{\frac{\Gamma}{\beta \cdot S_{II}}} \right)^2, \quad (4.11)$$

де Γ - безрозмірний коефіцієнт Генрі,

$$\Gamma = \frac{a_{\infty}}{C_0}, \quad (4.12)$$

де a_{∞} - кількість адсорбованої речовини, мг/кг;

b - коефіцієнт, який залежить від відношення вмісту поглинаючої речовини в газоповітряному потоці на виході та вході адсорбера (таблиця 4.1);

S_{II} - питома поверхня адсорбенту, м²/м³,

Таблиця 4.1 - Значення коефіцієнта b

C/C_0	b	C/C_0	b	C/C_0	b
0,005	1,84	0,1	0,94	0,5	0,07
0,01	1,67	0,2	0,63	0,6	-0,1
0,03	1,35	0,3	0,42	0,8	-0,27
0,05	1,19	0,4	0,23	0,9	-0,68

$$S_{\Pi} = \frac{4 \cdot (1 - \Pi_H) \cdot (0,5 \cdot d_3 + l_3)}{d_3 \cdot l_3}, \quad (4.13)$$

β - коефіцієнт масопередачі, який залежить від режиму течії газоповітряного потоку, с^{-1} :

а) якщо $Re < 30$, то

$$\beta = 0,833 \cdot Re^{0,47} \cdot Pr^{0,35} \cdot \frac{a}{d_{\text{екв}}^2}, \quad (4.14)$$

б) якщо $30 \leq Re \leq 50$, то

$$\beta = 0,53 \cdot Re^{0,64} \cdot Pr^{0,33} \cdot \frac{a}{d_{\text{екв}}^2}, \quad (4.15)$$

де Pr - дифузійний критерій Прандтля,

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (4.16)$$

де ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості газу при робочих умовах, $\text{м}^2/\text{с}$;

a - коефіцієнт дифузії вловлюваного газу в адсорбенті, $\text{м}^2/\text{с}$,

$$a = a_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,5} \cdot \frac{p_0}{p}, \quad (4.17)$$

де a_0 - коефіцієнт дифузії за нормальних умов (норм. умов. - температура газоповітряної суміші $T_0 = 273 \text{ К}$, початковий тиск $p_0 = 101,3 \text{ кПа}$), орієнтовно $a_0 = 0,5 \text{ м}^2/\text{с}$;

T - температура газоповітряної суміші, К ;

p - тиск газу при виході з адсорбера, кПа .

Для інших ділянок ізотерми адсорбції у даному прикладі розрахунок тривалості адсорбції не розглядається.

4.3 Порядок розрахунку адсорбційної установки

1 За формулою (4.1) визначаємо мінімальну необхідну масу сорбенту.

- 2 За формулою (4.5) визначаємо пористість зерна сорбенту.
- 3 За формулою (4.4) визначаємо еквівалентний діаметр зерна сорбенту.
- 4 За формулою (4.3) визначаємо коефіцієнт форми зерна сорбенту.
- 5 За формулою (4.2) визначаємо швидкість газоповітряного потоку, що надходить в адсорбер.
- 6 За формулами (4.9), (4.10) визначаємо геометричні розміри адсорбера – діаметр і довжину.
- 7 За формулою (4.13) визначаємо питому поверхню адсорбенту.
- 8 За формулою (4.12) визначаємо коефіцієнт Генрі.
- 9 За таблицею 4.1 визначаємо коефіцієнт b , що входить у формулу (4.11).
- 10 За формулою (4.8) визначаємо число Рейнольдса.
- 11 За формулою (4.17) визначаємо коефіцієнт дифузії вловлюваного газу в адсорбенті.
- 12 За формулою (4.16) визначаємо критерій Прандтля.
- 13 За формулами (4.14) або (4.15) визначаємо коефіцієнт масопередачі.
- 14 За формулою (4.11) визначаємо тривалість адсорбції.

Приклад розрахунку адсорбера

Розрахувати режими та конструктивні параметри адсорбційної установки. Визначити мінімальну масу адсорбенту; швидкість газоповітряної суміші, що подається в адсорбер; діаметр і довжину адсорбера; тривалість адсорбції.

Вихідні дані. В адсорбційній установці на адсорбенті (активоване вугілля) з газоповітряної суміші поглинається толуол. Об'ємна витрата газоповітряної суміші $Q_{\text{п}} = 75 \text{ м}^3/\text{с}$; концентрація толуолу в газоповітряній суміші на вході в адсорбер $C_0 = 80 \text{ мг}/\text{м}^3$; концентрація толуолу в суміші на виході з адсорберу $C = 60 \text{ мг}/\text{м}^3$; статична поглинальна здатність толуолу адсорбентом $a_{\infty} = 250 \text{ мг}/\text{кг}$; орієнтовний час адсорбції $\tau = 3 \text{ с}$; коефіцієнт запасу $K_3 = 1,1$; діаметр зерна активованого вугілля $d_3 = 0,004 \text{ м}$; довжина зерна $l_3 = 0,010 \text{ м}$; уявна густина сорбенту $\rho_y = 2,5 \text{ кг}/\text{м}^3$; насипна

густина сорбенту $\rho_n = 1,5 \text{ кг/м}^3$; густина толуолу $\rho_r = 1,2 \text{ кг/м}^3$; коефіцієнт кінематичної в'язкості толуолу $\nu = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; температура газоповітряної суміші $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; тиск газу при виході з адсорбера $p = 105,3 \text{ кПа}$; коефіцієнт гідравлічного опору $\zeta_r = 5,95$; орієнтовний коефіцієнт дифузії за норм. умов $a_0 = 0,5 \text{ м}^2/\text{с}$; перепад тиску $\Delta p = 4 \text{ кПа}$; режим течії газоповітряної суміші – прямоточний.

Розв'язання

1 За формулою (4.1) визначаємо мінімальну необхідну масу адсорбенту (активованого вугілля)

$$m_a = \frac{75 \cdot 80 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 1,1}{250 \cdot 10^{-3}} = 79,2 \cdot \text{кг.}$$

2 За формулою (4.5) визначаємо пористість шару адсорбенту

$$P_n = \frac{(2,5 - 1,5)}{2,5} = 0,40.$$

3 За формулою (4.4) визначаємо еквівалентний діаметр зерна адсорбенту

$$d_{\text{екв}} = \frac{0,40 \cdot 0,004 \cdot 0,01}{(1 - 0,40) \cdot (0,5 \cdot 0,004 + 0,01)} = 2,22 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

4 За формулою (4.3) визначаємо коефіцієнт форми зерна адсорбенту

$$\begin{aligned} k_\phi &= 1,5 \cdot 0,004 \cdot 0,01 \cdot (0,01 + 0,5 \cdot 0,004)^{-1} \cdot (1,5 \cdot 0,004^2 \cdot 0,01)^{-1,3} \\ &= 2,02 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

5 За формулою (4.2) визначаємо швидкість газоповітряного потоку, що надходить в адсорбер,

$$\omega_{\text{гп}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 2,02 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 2,23 \cdot 10^{-3} \cdot 0,40^3 \cdot 1,5 \cdot 75}{3 \cdot 5,95 \cdot 1,2 \cdot (1 - 0,40) \cdot 79,2}} = 7,98 \text{ м/с.}$$

6 За формулами (4.9), (4.10) визначаємо геометричні розміри адсорбера:

а) діаметр (отриману величину округляємо до цілих)

$$D_a = \sqrt{\frac{4 \cdot 75}{\pi \cdot 7,98 \cdot 0,40}} = 5,5 \approx 6,0 \text{ м};$$

б) довжину (отриману величину округляємо до цілих)

$$L_a = \sqrt{\frac{4 \cdot 79,2}{\pi \cdot 1,5 \cdot 6^2}} = 1,37 \approx 1,4 \text{ м}.$$

7 За формулою (4.13) визначаємо питому поверхню адсорбенту

$$S_{\Pi} = \frac{4 \cdot (1 - 0,40) \cdot (0,5 \cdot 0,004 + 0,01)}{0,004 \cdot 0,01} = 720 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

8 За таблицею 4.1 визначаємо коефіцієнт b : при $C/C_0 = 60/80 = 0,75$, тоді при інтерполяції

$$b = -0,25.$$

9 За формулою (4.12) визначаємо коефіцієнт Генрі

$$\Gamma = \frac{250}{80} = 3,1.$$

10 За формулою (4.8) визначаємо число Рейнольдса

$$Re = \frac{7,98 \cdot 2,23 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 10,6.$$

11 За формулою (4.17) визначаємо коефіцієнт дифузії вловлюваного газу в адсорбенті

$$a = 0,5 \cdot \left(\frac{30+273}{273}\right)^{1,5} \cdot \frac{101,3}{105,3} = 0,56 \text{ м}^2/\text{с}.$$

12 За формулою (4.16) визначаємо критерій Прандтля

$$Pr = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{0,52} = 4,46 \cdot 10^{-3}.$$

13 Визначаємо коефіцієнт масопередачі. Оскільки число Рейнольдса $Re = 10,63 < 30$, то для розрахунку використовуємо формулу (4.14)

$$\beta = 0,833 \cdot 10,63^{0,47} \cdot (4,46 \cdot 10^{-3})^{0,35} \cdot \frac{0,52}{(2,23 \cdot 10^{-3})^2} = 4,3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

14 За формулою (4.11) визначаємо тривалість адсорбції

$$\tau_{зд} = \left(1,4 \cdot \sqrt{\frac{60 \cdot 3,1}{7,98}} - (-0,25) \cdot \sqrt{\frac{3,1}{4,3 \cdot 10^4 \cdot 720}} \right)^2 = 45,7 \text{ с} \approx 46 \text{ с}.$$

Завдання

Розрахувати режими та конструктивні параметри адсорбційної установки. Визначити мінімальну масу адсорбенту; швидкість газоповітряної суміші, що подається в адсорбер; діаметр і довжину адсорбера, тривалість адсорбції. Зробити висновок.

Вихідні дані. В адсорбційній установці на адсорбенті (активоване вугілля) з газоповітряної суміші поглинається пара толуолу; статична поглинальна здатність толуолу адсорбентом $a_\infty = 250$ мг/кг; діаметр зерна активованого вугілля $d_3 = 0,004$ м; довжина зерна $l_3 = 0,010$ м; уявна густина сорбенту $\rho_y = 2,5$ кг/м³; насипна густина сорбенту $\rho_n = 1,5$ кг/м³; густина толуолу $\rho_T = 1,2$ кг/м³; коефіцієнт кінематичної в'язкості толуолу $\nu = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м²/с; коефіцієнт гідравлічного опору $\zeta_r = 5,95$; орієнтовний коефіцієнт дифузії за норм. умов $a_0 = 0,5$ м²/с; режим течії газоповітряної суміші – прямоточний.

Інші дані прийняти відповідно до варіанта за таблицею 4.2.

Таблиця 4.2 - Вихідні дані для розрахунку адсорбера

Вихідна величина	Варіант						
	1	2	3	4	5	6	7
Об'ємна витрата газоповітряної суміші Q_n , м ³ /с	60	65	70	80	65	70	60
Концентрація толуолу в газоповітряній суміші на вході в адсорбер C_0 , мг/м ³	55	60	65	70	75	80	65
Концентрація толуолу в суміші на виході з адсорбера C , мг/м ³	40	40	45	50	50	55	55
Орієнтовний час адсорбції, с	3	4	5	3	4	5	4
Коефіцієнт запасу K_3	1,1	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,1
Температура газоповітряної суміші t , °С	30	35	30	35	30	35	30
Тиск газу при виході з адсорбера p , кПа	103, 3	104, 3	105, 3	106, 3	104, 3	105, 3	103, 3
Перепад тиску Δp , кПа	2	3	4	5	3	4	5

Контрольні питання

- 1 Дайте визначення термінів «адсорбція», «адсорбент», «адсорбтив», «адсорбат».
- 2 Чим відрізняється фізична адсорбція від хімічної? Який вид адсорбції має переважати при адсорбційному очищенні газів?
- 3 У чому полягає принцип роботи адсорбера періодичної дії?
- 4 Назвіть поширені промислові адсорбенти.
- 5 Що таке «адсорбційна здатність»?
- 6 Назвіть характерні області ізотерми адсорбції.
- 7 Який зв'язок між температурою та адсорбційною здатністю адсорбенту?

Список літератури

1 Про охорону атмосферного повітря: Закон України. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 1992. № 50. С. 678.

2 Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) (ДСП-201-97). Затв. наказом МОЗ України від 9.07.1997 № 20. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0201282-97>.

3 Нормативи гранично допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел: наказ Мін-ва охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06#Text>.

4 Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів: наказ МОЗУ від 19.06.1996 № 173. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96>.

5 Джигирей В. С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища: навч. посіб. Київ: Знання, 2000. 203 с.

6 Инженерная защита окружающей среды в примерах и задачах: учеб. пособ. / под ред. О. Г. Воробьева. Санкт-Петербург: «Лань», 2002. 288 с.

7 Сторожук В. М., Батлук В. А., Назарук М. М. Промислова екологія: підручник. Львів: Українська академія друкарства, 2006. 547 с.

8 Экология города: учебник / под общ. ред. Ф. В. Стольберга. Киев: Либра, 2000. 464 с.

9 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД-86 Госкомгидромета от 04.08.1986 № 192. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 68 с.

10 Апостолюк С. О., Джигирей В. С., Апостолюк А. С. та ін. Практикум з промислової екології. Київ: Основа, 2005. 224 с.

11 Податковий кодекс України. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2011. № 13-14; № 15-16; № 17, ст. 112. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#n5992>.

12 Циклон (техніка). *Вікіпедія – вільна енциклопедія*. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D0%BD_\(%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%B](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D0%BD_(%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%B)

D%D1%96%D0%BA%D0%B0)#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Cyclone_separator.svg (дата звернення: 08.06.2021).

13 Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др.; под общ. ред. А. А. Русанова. Изд. 2-ое, перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

14 Розрахунок апарату очистки газів на прикладі циклона ЦН-15: метод. рекомендації до вик. розрах.-граф. роботи з дисц. «Прикладна аероекологія» / В. Є. Бекетов, Г. П. Євтухова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 12 с.

15 Природоохоронні технології. Ч. 1. Захист атмосфери / Л. І. Северін, В. Г. Петрук, І. І. Безвозюк, І. В. Васильківський. Вінниця: ВНТУ, 2012. 388 с.

16 Апостолюк С. О., Джигирей В. С., Соколовський І. А. та ін. Промислова екологія: навч. посіб. Вид. 2-ге, випр. і доп. Київ: Знання, 2012. 430 с.

ЗАХИСТ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ
ШКІДЛИВИМИ РЕЧОВИНАМИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять з дисципліни
«ПРОМИСЛОВА ЕКОЛОГІЯ»

Відповідальний за випуск Кисельова С. О.

Редактор Третьякова К. А.

Підписано до друку 29.06.21 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк. арк. 1,75. Тираж 5. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.