

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

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до практичних занять**

з дисципліни «Системи технологій та інженерна екологія»  
для студентів спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього  
середовища» усіх форм навчання

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол №1 від 13 лютого 2025 р.

Харків  
НТУ «ХП»  
2025

**Методичні вказівки** до практичних занять з дисципліни «Системи технологій та інженерна екологія» для студентів спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього середовища» усіх форм навчання / уклад. Н.М. Самойленко, О.В. Шестопапов, А.С. Босюк, А.Г. Тульська – Харків: НТУ «ХП», 2025. – 55 с.

Укладачі: Н.М. Самойленко  
О.В. Шестопапов  
А.С. Босюк  
А.Г. Тульська

Рецензент І.Л. Красніков

Кафедра хімічної техніки та промислової екології

## ВСТУП

Технологічні процеси та виробництва, які використовуються на підприємствах, відіграють ключову роль у негативному впливі людської діяльності на довкілля. Дисципліна «Системи технологій та інженерна екологія» передбачає вивчення основних аспектів щодо формування джерел забруднення навколишнього середовища та використання природних ресурсів, а також шляхів зменшення негативної дії виробництв на довкілля з використанням інженерних рішень. Практичні заняття з цієї дисципліни включають розгляд технологічних процесів найважливіших галузей народного господарства України, виконання відповідних технологічних і екологічних розрахунків та пошук вирішення природоохоронних проблем, що з ними пов'язуються.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1

**Тема: Виплавка сталі киснево-конверторним способом: конструкційні особливості апаратів та екологічні аспекти.**

**Мета заняття:** ознайомитися з принциповими особливостями виплавки сталі киснево-конверторним способом, методикою розрахунку конвертора, що є джерелом забруднених викидів, а також проаналізувати практичні підходи до їх очищення і використання конвертерного газу.

### 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.

Конвертерне виробництво сталі – це процес отримання сталі в сталеплавильних агрегатах (конвертерах) шляхом продування рідкого чавуну киснем або повітрям. На початок ХХІ століття понад 60% світового виробництва сталі здійснювалось конвертерним способом, а у 2020 р. вже 70 % світового обсягу сталі отримувалося цим способом. Використання технічно чистого кисню з невеликим вмістом азоту дозволило не тільки одержувати сталь високої якості, але й переробляти у конвертерах значну кількість металевого брухту.

Киснево-конверторний спосіб є найпродуктивнішим серед інших способів виробництва сталі, а киснево-конвертерна сталь у порівнянні з мартенівської і електросталлю характеризується більшою якістю і меншою собівартістю. Водночас недоліком способу є велике пилоутворення та значний вигар металу, що в середньому становить 6 – 9%.

Перетворення чавуну на сталь зазначеним шляхом відбувається внаслідок окислення домішок, що містяться в чавуні (кремнію, марганцю, вуглецю тощо), з подальшим їх видаленням із розплаву. Утворене під час

окислення тепло підвищує температуру розплаву до рівня, необхідного для утворення сталі, що дозволяє конвертеру працювати без додаткового палива.

Для надходження окиснювача для процесу плавки використовуються апарати з різною продувкою: верхньою, донною та комбінованою, при якій такий процес здійснюється зверху та знизу. Для цього у конверторах використовуються сопла (фурми).

Кожен із способів дуття має свої переваги і недоліки, які враховуються при проведенні програми плавки. З ресурсної точки зору важливим є аспект використання при плавці брухту. Технологічні варіанти конвертерного способу отримання сталі на основі верхньої продувки або комбінованої при подачі через днище нейтрального газу направлені на переробку до 30-32% брухту. Кисневе донне дуття застосовується при необхідності роботи з великою кількістю брухту (40% і більше).

У конвертери комбінованого дуття разом із подаванням кисню зверху через дуттьові пристрої, які встановлені в днищі, вводять різні присадки. При переробці чавуну, що містить вище 0,3 % фосфору, порошкоподібне вапно вдувається через верхні або донні фурми.

Під час роботи конвертера утворюється конверторний газ в об'ємі 60- 80 м<sup>3</sup> димових газів на тонну сталі. Приблизний склад конверторного газу: 80-90% CO, 7-8% CO<sub>2</sub>, 2-5% H<sub>2</sub> та незначна кількість N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> і інших газів. Конверторний пил переважно складається з оксидів заліза і містить 60-65% Fe, 2-6% Mn, а решта – SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та інші оксиди. 50-80% частинок пилу мають розміри менше, ніж 10-5 мкм, що ускладнює очищення від них газів. Для сухого очищення газу часто використовують електрофільтри, а для мокрого – мокрі системи з трубами Вентурі.

Обсяги конверторного газу в значній мірі визначаються розмірами конвертера, в реакційних зонах якого утворюються газові компоненти. Спосіб дуття ж впливає на димовиділення (випар заліза й оксидів заліза), від якого залежить газоочищення.

Конверторний газ є високоякісним технологічним і енергетичним паливом, що слід враховувати при виборі системи та способу його відведення й використання. При відведенні газу без доступу повітря пилові частки мають більші розміри, і це впливає на вибір схеми газоочищення. Чим дрібніші фракції пилу, тим вищі вимоги до ефективності газоочисної системи. Температура газу перед газоочищенням не повинна перевищувати 200–300°C. На виході ж з кисневого конвертера вона становить приблизно 1600°C. Тому перед очищенням газ попередньо охолоджується.

Охолодження конвертерного газу можливо здійснювати кількома способами:

1. Розведення повітрям – змішування газу з холодним повітрям для зниження температури.

2. Впорскування води – розпилення води, яка випаровується, поглинаючи теплоту газу.

3. Обладнання газоходу водоохолодними камінами або екранами – використання спеціальних конструкцій із водяним охолодженням для ефективного зниження температури.

4. Вироблення пари в котлах-утилізаторах – використання фізичної теплоти конвертерних газів або продуктів їх згоряння для генерації пари, що може бути використана в енергетичних або технологічних процесах. Найчастіше ці способи охолодження комбінуються для досягнення оптимальних умов роботи газоочисної системи. Вибір способу охолодження та конструкції охолоджувального обладнання має значний вплив на технологічний процес виплавки сталі та ключові показники конвертерного виробництва, зокрема, ефективність використання енергії, рівень забруднення газового потоку та знос технологічного обладнання.

На сьогодні розрізняють три основні режими відведення конверторного газу: з повним спалюванням CO, з частковим спалюванням CO; без допалювання CO.

Величина коефіцієнта витрати повітря на вході ( $\alpha$ ) визначається як:

$\alpha > 1$  – повне спалювання газу за наявності доступу повітря.

$0 < \alpha < 1$  – часткове спалювання газу при обмеженому доступі повітря.

$\alpha = 0$  – без доступу повітря, без спалювання газу.

Системи відведення газів із повним або частковим допалюванням оксиду вуглецю у конвертері не досконалі. У таких схемах хімічна енергія конвертерних газів не використовується та втрачається, що знижує загальну енергоефективність процесу.

При виборі апаратів газоочищення необхідно враховувати відмінності у фракційному складі пилу між продуктами згоряння (із допалюванням CO) та конвертерним газом (без допалювання), що потрапляють у газові тракти цих систем. У разі відведення газу без допалювання особливу увагу слід приділяти герметизації газоходу, оскільки оксид вуглецю, що становить близько 90% конвертерного газу, є високотоксичним.

Охолоджений та очищений конвертерний газ використовується у подальшому. Гази, що виходять із кисневого конвертера, містять значну кількість енергії (приблизно 0,95–1,05 МДж/т сталі), де 20% припадає на фізичне тепло, а 80% – на хімічну енергію. Використання енергії конвертерних газів є ефективним джерелом чорної металургії.

Конвертерний газ з температурою 1600°C може направлятися у котел-утилізатор, охолоджуватися до 1100°C та використовуватися для отримання технологічної пари. Інший спосіб – після відбирання тепла у котлі-утилізаторі та очищення газ надходить у газгольдер для усереднення складу та у подальшому використовується на ТЕЦ. Для підвищення

енергетичної цінності конвертерного газу доцільно видалити з його складу CO та замінити його на горючий елемент.

## 2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ КИСНЕВОГО КОНВЕРТОРА З ВЕРХНЬОЮ ПРОДУВКОЮ.

У даному розрахунку визначаються основні характеристики конверторів з верхньою продувкою, в залежності від об'єму яких продукуються ті чи інші обсяги забрудненого газу. Слід зазначити, що у даних апаратах виплавляється сталь з використанням значних обсягів брухту; водночас існує тенденція до переходу конверторів з верхньою продувкою до комбінованої.

### 2.1 Методика розрахунку.

1. Необхідний розмір внутрішнього діаметра циліндричної частини конвертера  $D_B$ , м, приймається згідно табл.1.

Таблиця 1 – Співвідношення садки та внутрішнього діаметра конвертера.

| Садка, т | Внутрішній діаметр, м | Садка, т | Внутрішній діаметр, м |
|----------|-----------------------|----------|-----------------------|
| 50       | 3,2-3,4               | 200-240  | 5,1-5,9               |
| 100      | 4,0-4,4               | 270      | 6,91                  |
| 130      | 4,42                  | 275-300  | 5,92-6,91             |
| 150-175  | 4,93-5,15             | 335      | 6,7                   |
| 180-190  | 5,4-5,56              |          |                       |

2. Висота робочого простору від зрізу горловини до центру днища  $H_1$  визначається за формулою:

$$H_1 = 1,4 \cdot D_B, \text{ м} \quad (1)$$

3. Якщо значення куту нахилу горловини до вертикалі ( $\alpha$ ) в діючих конверторах коливається в межах  $53-71^\circ$ , то середнє значення можна прийняти як  $\alpha=60^\circ$ .

4. Діаметр горловини можна  $D_G$  визначається за формулою:

$$D_G = 0,52 - 0,63 \cdot D_B, \text{ м} \quad (2)$$

Для зручності розрахунку приймається  $D_G = 0,55 \cdot D_B$ .

5. Висота горловини  $H_G$  знаходиться за формулою:

$$H_G = \frac{D_B - D_G}{2} \cdot \text{tg} 60^\circ, \text{ м} \quad (3)$$

6. Об'єм рідкого металу  $V_{р.м.}$  визначається як:

$$V_{р.м.} = C \cdot d, \text{ м}^3 \quad (4)$$

де  $C$  – місткість садки, т;

$d$  – питомий об'єм рідкої сталі,  $d = 0,14 \text{ м}^3/\text{т}$ .

7. Метал у спокійному стані  $V_M$ ,  $m^3$ , вміщується в кульовому сегменті  $V_{к.с.}$  і в циліндричній частині  $V_{ц.ч.}$  конвертера:

$$V_M = V_{к.с.} + V_{ц.ч.} \quad (5)$$

8. Об'єм кульового сегменту ( $m^3$ ) складає:

$$V_{к.с.} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h_{к.с.} \cdot (3 \cdot r_B^2 \cdot h_{к.с.} + h_{к.с.}^3), \quad (6)$$

де  $r_B$  – внутрішній радіус циліндричної частини конвертера, м;  
 $h_{к.с.}$  – глибина кульового сегменту,  $h_{к.с.} = 0,32$  м.

9. Об'єм циліндричної частини конвертера, що занята металом, ( $m^3$ ) визначається за формулою:

$$V_{ц.ч.} = \pi \cdot r_B^2 \cdot h_{ц.ч.} \quad (7)$$

Висота циліндричної частини  $h_{ц.ч.}$  (м) знаходиться з нерівності:

$$V_{р.м.} = V_{к.с.} + V_{ц.ч.}$$

10. Загальна глибина металевої ванни  $h_M$  визначається як:

$$h_M = h_{ц.ч.} + h_{к.с.}, \text{ м} \quad (8)$$

11. При кількості шлаку 10% і його щільності  $\rho = 3000$   $кг/м^3$ , шар шлаку  $h_{ш}$  визначається за формулою:

$$h_{ш} = \frac{c \cdot 0,1 \cdot 1000}{\rho \cdot \pi \cdot r_B^2}, \text{ м} \quad (9)$$

де  $C$  – місткість садки, т.

12. Загальна глибина ванни у спокійному стані  $h_{заг}$  дорівнює:

$$h_{заг} = h_M + h_{ш}, \text{ м} \quad (10)$$

Розрахункове значення глибини ванни повинно відповідати вимогам табл. 2.

Таблиця 2 – Глибина рідкої ванни в спокійному стані

| Садка, т | Глибина, м | Садка, т | Глибина, м |
|----------|------------|----------|------------|
| 50       | 1,05-1,1   | 200-240  | 1,64-2,0   |
| 100      | 1,4-1,5    | 270      | 1,57-1,71  |
| 130      | 1,52       | 275-300  | 1,75-2,0   |
| 150-175  | 1,32-1,8   | 335      | 2,0        |
| 180-190  | 1,63-1,7   |          |            |

13. Висота циліндричної частини  $H_{цил}$  визначається за формулою:

$$H_{цил} = H_1 - H_T - h_{к.с.}, \text{ м} \quad (11)$$

14. При товщині кладки днища 1,0 і товщині кожуху 0,03 м загальна висота конвертера  $H_{ЗАГ}$  складає:

$$H_{ЗАГ} = H_1 + 1,0 + 0,03 \text{ м} \quad (12)$$

15. Повний об'єм робочого простору  $V_{р.п.}$  дорівнює:

$$V_{р.п.} = V_{Г} + V_{Ц} + V_{к.с.}, \text{ м}^3 \quad (13)$$

Об'єм горловини ( $V_{Г}$ ), що представляє собою фігуру зрізаного конусу, визначається за формулою:

$$V_{Г} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot H_{Г} \cdot (r_{В}^2 + r_{М}^2 + h_{М}), \text{ м}^3 \quad (14)$$

Об'єм циліндричної частини конвертера  $V_{Ц}$  знаходиться за формулою:

$$V_{Ц} = \pi \cdot r_{В}^2 \cdot H_{ЦИЛ}, \text{ м}^3 \quad (15)$$

16. Питомий об'єм робочого простору  $V_{Р.П.(ПИТ.)}$  конвертера :

$$V_{Р.П.(ПИТ.)} = V_{Р.П.} / C, \text{ м}^3/\text{т} \quad (16)$$

17. Відстань від рівня спокійної ванни до зрізу горловини  $H_C$ :

$$H_C = H_1 - h_{ЗАГ}, \text{ м} \quad (17)$$

За формулою (13) визначається повний об'єм робочого простору  $V_{р.п.}$

## 2.2 Приклад розрахунку конвертера.

**Завдання.** Визначити основні розміри конвертера при роботі зі скрапом, якщо його місткість становить 300 т.

### Рішення.

1. Для конвертера з садкою 300 т за таблицею 1 приймаємо розмір внутрішнього діаметра циліндричної частини конвертера  $D_{В} = 6,0$  м.

2. Висота робочого простору від зрізу горловини до центру днища  $H_1$  за формулою (1) складе:  $1,4 \cdot D_{В}$  або  $H_1 = 1,4 \cdot 6 = 8,4$  м

3. З урахуванням того, що значення куту нахилу горловини до вертикалі  $\alpha$  в діючих конвертерах середньої і великої садки коливається в межах  $53-71^\circ$ , приймаємо  $\alpha = 60^\circ$ .

4. Діаметр горловини  $D_{\Gamma}$  дорівнює  $0,52 - 0,63 \cdot D_B$  (формула (2)).  
 Приймаємо  $D_{\Gamma} = 0,550 \cdot D_B$ .  $D_{\Gamma} = 0,550 \cdot D_B = 0,550 \cdot 6,0 = 3,3$  м.

5. Висота горловини за формулою (3) складає:

$$H_{\Gamma} = \frac{(D_B - D_{\Gamma})}{2} \cdot \operatorname{tg} 60^{\circ} = \frac{(6,0 - 3,3)}{2} \cdot 1,732 = 2,02 \text{ м.}$$

6. Об'єм рідкого металу  $V_{p.m.}$  (формула (4)):

$$V_{p.m.} = C \cdot d,$$

$d$  – питомий об'єм рідкої сталі;  $d = 0,14 \text{ м}^3/\text{т}$

$$V_{p.m.} = 300 \cdot 0,14 = 42 \text{ м}^3.$$

7. Метал у спокійному стані вміщується в кульовому сегменті  $V_{к.с.}$  і в циліндричній частині  $V_{ц.ч.}$  конвертора (формула 5):

$$V_M = V_{к.с.} + V_{ц.ч.}$$

Об'єм кульового сегменту  $V_{к.с.}$  визначається відповідно формули (6):

$$V_{к.с.} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h_{к.с.} \cdot (3 \cdot r_B^2 + h_{к.с.}^2) = \frac{1}{6} \cdot 3,14 \cdot 0,32 \cdot (3 \cdot 3^2 + 0,32^2) = 4,54 \text{ м,}$$

0,32 – прийнята глибина кульового сегменту  $h_{к.с.}$ , м.

Об'єм циліндричної частини конвертора, що зайнята металом, (формула (7)):

$$V_{ц.ч.} = \pi \cdot r_B^2 \cdot h_{ц.ч.} = 3,14 \cdot 3^2 \cdot h_{ц.ч.} = 28,26 \cdot h_{ц.ч.}$$

Об'єм металу, який розташований у циліндричній частині конвертора:

$$V_M = V_{к.с.} + V_{ц.ч.}$$

$$42 = 4,54 + 28,26 \cdot h_{ц.ч.}, \text{ звідки } h_{ц.ч.} = 1,33 \text{ м.}$$

8. Загальна глибина металевої ванни згідно формули (8),  $h_M$ :

$$h_M = h_{ц.ч.} + h_{к.с.} = 1,33 + 0,32 = 1,65 \text{ м.}$$

9. Якщо прийняти кількість шлаку рівним 10 % і його щільність  $\rho = 3000 \text{ кг/м}^3$ , то шар шлаку  $h_{ш}$  дорівнює (формула (9)):

$$h_{ш} = \frac{C \cdot 0,10 \cdot 1000}{\rho \cdot \pi \cdot r_B^2} = \frac{300 \cdot 0,10 \cdot 1000}{3000 \cdot 3,14 \cdot 3^2} = 0,35 \text{ м.}$$

10. Загальна глибина ванни в спокійному стані,  $h_{ЗАГ}$ , згідно формули (10) дорівнює:

$$h_{ЗАГ} = h_M + h_{ш} = 1,65 + 0,35 = 2 \text{ м.}$$

Розраховане значення глибини ванни відповідає вимогам таблиці 2.

11. Висота циліндричної частини конвертора  $H_{ЦИЛ}$  (формула (11)):

$$H_{ЦИЛ} = H_1 - H_{\Gamma} - h_{к.с.} = 8,4 - 2,02 - 0,32 = 5,74 \text{ м.}$$

12. При товщині кладки днища 1,0 і товщині кожуху 0,03 м загальна висота конвертора  $H_{ЗАГ}$  згідно формули (12):

$$H_{ЗАГ} = H_1 + 1,0 + 0,03 = 8,4 + 1,0 + 0,03 = 9,43 \text{ м.}$$

13. Повний об'єм робочого простору  $V_{Р.П.}$  (формула (13):

$$V_{Р.П.} = V_{Г} + V_{Ц} + V_{К.С.}$$

Об'єм горловини  $V_{Г}$ , що являє собою фігуру зрізаного конусу, визначається з формули (14),  $\text{м}^3$ :

$$V_{Г} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot H_{Г} \cdot (r_{В}^2 + r_{В}^2 \cdot r_{Г} + r_{Г}^2) = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \cdot 2,02 \cdot (3^2 + 3^2 \cdot 1,65 + 1,65^2) = 56,18$$

Об'єм циліндричної частини конвертора  $V_{Ц}$  (формула (15):

$$V_{Ц} = \pi \cdot r_{В}^2 \cdot H_{ЦИЛ} = 3,14 \cdot 3^2 \cdot 5,74 = 162,21 \text{ м}^3.$$

Об'єм робочого простору:

$$V_{Р.П.} = V_{Г} + V_{Ц} + V_{К.С.} = 56,18 + 162,21 + 4,54 = 222,93 \text{ м}^3.$$

14. Питомий об'єм робочого простору  $V_{Р.П.}$  конвертора :

$$V_{Р.П.} = 222,93/300 = 0,743 \text{ м}^3/\text{т.}$$

15. Відстань від рівня спокійної ванни до зрізу горловини  $H_{С}$ :

$$H_{С} = H_1 - h_{ЗАГ} = 8,4 - 2 = 6,4 \text{ м.}$$

В таблиці 3 приведені основні характеристики конверторів, що мають номінальну ємність.

Таблиця 3 – Характеристика конвертерів

| Характеристики   | Номінальна ємність конвертера, т |      |      |      |      |      |      |
|--|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|  | 350                              | 320  | 250  | 160  | 130  | 100  | 50   |
| Обсяг робочого простору, $\text{м}^3$                        | 318                              | 263  | 250  | 136  | 108  | 91   | 54   |
| Питомий об'єм, $\text{м}^3/\text{т}$                         | 0,91                             | 0,87 | 1,0  | 0,85 | 0,83 | 0,91 | 1,08 |
| Глибина ванни рідкого металу                                 | 1800                             | 1897 | 1550 | 1550 | 1470 | 1250 | 969  |
| Розміри по футеровці, мм                                     |                                  |      |      |      |      |      |      |
| –діаметр циліндричної частини                                | 6950                             | 6600 | 6600 | 5450 | 4820 | 4300 | 3700 |
| –діаметр горловини   | 4000                             | 3430 | 3200 | 2200 | 2300 | 2150 | 1700 |
| –висота робочого простору (до горловини у вузькому перетині) | 10075                            | 9215 | 8920 | 7400 | 7240 | 7275 | 5940 |

### 3. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ.

На основі даних, наведених у табл. 5, визначити основні розміри конвертора під час роботи апарату зі скрапом.

Таблиця 5 – Вихідні дані для розрахунку.

| Вар.     | 1   | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|----------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Садка, т | 100 | 50 | 250 | 300 | 200 | 160 | 330 | 150 | 280 | 350 |

#### Контрольні питання.

1. Переваги та недоліки киснево-конверторного способу виробництва сталі.
2. Особливості конверторної плавки та призначення продувки у її процесі.
3. Способи продувки конвертора. Продувні фурми.
4. Склад конверторного газу та система його очищення
5. Способи охолодження конвертерного газу.
6. Напрямки використання конверторного газу як енергетичного ресурсу.

#### Список літератури

1. 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.
2. Спеціальне обладнання та процеси неорганічної хімії : підручник / Пляцук Л. Д., Манойло Є. В., Шестопапов О. В., Моїсєєв В. Ф., Козій І. С. та ін. Суми : Університетська книга, 2022. – 390 с.
3. Самойленко Н.М., Аверченко В.І., Байрачний В.Б. Системи технологій та промислова екологія. Ч.1. Металургійний та енергетичний комплекс: навч. посіб. для студентів спеціальності Системи технологій та інженерна екологія 101 «Екологія» / Н.М.Самойленко, В.І.Аверченко, В.Б.Байрачний. Харків : НТУ«ХП», Лідер, 2020. – 212 с.
4. Технологія основних виробництв: навч. посібник для студентів денної та заочної форм навчання / В.М. Кропівний, А.В. Кропівна, Л.А. Молокост, М.В.Босий, О.В. Кузик – Кропивницький : Видавництво ТОВ КОД», 2021. – 196 с.
5. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: Навч. посібник / А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко / За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. – К.: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. – 224 с.
6. Гурін В.А., Востріков В.П., Кузьмич Л.В. Основи промислових технологій і матеріалознавство: навч. посіб. / В.А. Гурін, В.П. Востріков, Л.В. Кузьмич. Рівне : НУВГП, 2019. – 310 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2

**Тема: Викиди забруднюючих речовин, утворені у металургійному виробництві. Вибір та обґрунтування системи їх очищення.**

**Мета заняття:** охарактеризувати металургійне виробництво як одне з основних джерел забруднення атмосфери, оцінити обсяги утворення забруднюючих речовин у ключових технологічних процесах, а також проаналізувати сучасні системи (обладнання) очищення, що можуть застосовуватись для зниження негативного впливу на атмосферу у даному виробництві.

### 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.

Металургійний комплекс – це сукупність підприємств, що займаються видобутком, збагаченням руд, виробництвом металів і їх подальшою обробкою. Він є стратегічно важливим для промислового розвитку, адже забезпечує металопродукцією машинобудування, будівництва, транспорту, енергетики та інші галузі.

Металургійний комплекс поділяється на дві основні галузі:

– *чорна металургія* – виробництво чавуну, сталі, феросплавів і прокату з руд заліза та марганцю.

– *кольорова металургія* – виплавка кольорових металів (алюміній, мідь, нікель, свинець, цинк тощо) з відповідних руд.

Металургійний комплекс є значним джерелом забруднення повітря. У чорній металургії основні забруднення утворюються під час агломерації, виплавки чавуну та сталі, а у кольоровій – при виробництві глинозему, алюмінію, міді, цинку, свинцю та нікелю.

В табл.1 представлені дані щодо забруднених викидів металургійного виробництва [1].

Таблиця 1 – Газові викиди металургійного виробництва.

| Складові викидів             | Агломерційне виробництво, кг/т агломератів | Доменне виробництво, кг/т чавуну* | Сталеплавильне виробництво, кг/т сталі | Прокатне виробництво     |
|------------------------------|--|-----------------------------------|--|--------------------------|
| Пил                          | 20-25                                      | 100-105                           | 13-32                                  | 0,1-0,2 кг/т прокату     |
| Оксид карбону                | 20-50                                      | 600-605                           | 0,4-0,6                                | 0,7 т/м поверхні металу  |
| Оксид сульфуру               | 3-25                                       | 0,2-0,3                           | 0,4-35                                 | 0,4 т/м поверхні металу  |
| Оксид нітрогену              |  |                                   | 0,3-3,0                                | 0,5 т/м поверхні металу  |
| Сірководень                  |  | 10-60                             |  |                          |
| Аерозолі травильних розчинів |  |                                   |  | у травильному відділенні |
| Пари емульсії                |  |                                   |  | при металообробці        |

Викиди чорної металургії складаються переважно з оксиду карбону, пилу, оксидів сульфуру та нітрогену. Найбільша частка викидів оксиду карбону приходить на чорну металургію, а оксиду сульфуру – на кольорову.

Викиди CO<sub>2</sub>, що підлягають моніторингу як парниковий газ, формуються при випалюванні карбонатних руд, використанні палива (природний газ, вугілля, кокс), а також технологічних газів (коксівий, доменний, конвертерний газ).

До основних джерел забруднення атмосфери відносяться агломераційне, коксове виробництво, доменне виробництво чавуну, сталеплавильне виробництво та ін. У табл. 2 наведено значення питомих викидів (т/добу), що утворюються під час виробництва 1 млн т сталі.

Таблиця 2 – Питомі викиди, що супроводжують виробництво 1 млн т сталі.

| Виробництво           | Тверді частки | SO <sub>2</sub> | CO   |
|-----------------------|---------------|-----------------|------|
| Агломераційне         | 91            | 14,5            | 250  |
| Коксохімічне          | 1,0           | 1,3             | 14,2 |
| Доменне               | 11            | 3,3             | 10,6 |
| Мартенівське          | 14            | 1,2             | 0,7  |
| Конверторне           | 7,0           | 1,2             | 1,5  |
| Електросталеплавильне | 1,1           | 0,3             | -    |

Пил агломераційного виробництва має такий дисперсійний склад: до 5 мкм (5%), 5–10 мкм (3-4%), 10–15 мкм (2%), понад 50 мкм (більше 60%). При виробництві 1 т агломерату утворюється 2,0–4,8 тис. м<sup>3</sup> забруднених газів. Технологічні викиди містять 10–15, а неорганізовані – 20–40 кг пилу. Викиди також включають 30–50 кг оксиду карбону, 3–15 кг оксидів сульфуру та 0,6–1,0 кг оксидів нітрогену. З викидами виноситься 6–8% виробленого агломерату.

Гасіння (охолодження) коксу проводиться і сухим способом. У першому випадку стічні води забруднюються аміаком, фенолами, ціанідами, піридином, ПАР і ін. Сухе проводиться інертним газом, який циркулює в системі охолодження; в атмосферу виділяється (г/с): бенз(а)пірену – 616, H<sub>2</sub>S – 3,7, ціанідів – 4,6, NO<sub>x</sub> – 20, CO – 317.

У виробництві однієї тонни чавуну утворюється приблизно 2000 м<sup>3</sup> доменного газу. Доменний газ містить 3,5 – 3,6% гідрогену, 0,1 – 0,4% кисню, 0,1-0,6% метану, 55% нітрогену, 25 – 32% оксиду карбону, 10 – 15% діоксиду карбону, значну кількість пилу.

У середньому на 1 млн т річної продуктивності підприємства чорної металургії виділяють: пил – 350 т/добу, SO<sub>2</sub> – 200 т/добу, NO<sub>x</sub> – 42 т/добу, CO – 400 т/добу.

Виплавка однієї тонни сталі пов'язана з викидами в атмосферу 40 кг твердих часток, 30 кг діоксиду сульфуру, близько 50 кг оксиду карбону. Пил містить сполуки Mn, Fe, Cu, Zn, Cd, Pb та ін.

У процесі виплавки високолегованих сталей у докілья надходять сполуки Va, Cr, Ni, Mo та ін. Конверторний спосіб одержання сталі, в залежності від технологічних особливостей плавки, супроводжується виносом таких забруднюючих речовин як пил, монооксид карбону, сульфід гідрогену, фтор, хлор.

Електродугова виплавка сталі пов'язана з утворенням забруднених викидів з вмістом пилу, оксиду вуглецю, діоксиду азоту. Найбільш екологічним з точки зору формування забруднювачів є індукційна виплавка сталі. Водночас обсяги виробництва сталі таким способом порівняно невеликі.

## 2. ОЦІНКА ОБСЯГІВ ПИЛУ, ЩО УТВОРЮЄТЬСЯ У КОНВЕРТОРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ.

Пил, що утворюється при виплавці сталі конвертерним способом, здебільшого складається із заліза та його оксидів. Тому при розрахунках обсягів викидів враховуються переважно ці речовини.

1. Середня інтенсивність виносу пилу  $M_{сер}$  визначається за формулою:

$$M_{сер} = \frac{M_{Fe} \cdot n \cdot 100}{Fe_{заг}}, \text{ кг/хв} \quad (1)$$

де  $M_{Fe}$  – середня інтенсивність виносу оксидів заліза з однієї реакційної зони, кг/хв (табл. 3);

$n$  – кількість реакційних зон (сопел);

$Fe_{заг}$  – вміст заліза у конвертерному пилу на виході з горловини конвертера, %.

Таблиця 3 – Витрати кисню на одне сопло

|                                   |     |     |     |      |      |      |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| Витрати кисню, м <sup>3</sup> /хв | 30  | 40  | 50  | 60   | 70   | 80   |
| Винос заліза зі шлаком, кг/хв     | 2,0 | 5,0 | 8,5 | 12,5 | 17,0 | 22,5 |

2. Максимальний винос пилу  $M_{макс}$ , який враховує використання шихтових матеріалів визначається за формулою:

$$M_{макс} = k_{макс} \cdot M_{сер}, \text{ кг/хв} \quad (2)$$

де  $k_{макс}$  – коефіцієнт, який залежить від питомої інтенсивності продувки (табл. 4).

Таблиця 4 – Змінення коефіцієнта  $k_{\text{макс}}$  від інтенсивності продувки.

|  |     |     |      |      |
|--|-----|-----|------|------|
| Інтенсивність продувки, м <sup>3</sup> /т·хв | 3   | 4   | 5    | 6    |
| Коефіцієнт $k_{\text{макс}}$                 | 5,0 | 8,5 | 12,5 | 17,0 |

3. Сумарний винос пилу за плавку  $M_{\text{сум}}$  визначається за формулою:

$$M_{\text{сум}} = k_{\text{сум}} \cdot M_{\text{сер}} \cdot \tau, \text{ кг} \quad (3)$$

де  $k_{\text{сум}}$  – коефіцієнт, який залежить від питомої інтенсивності продувки (табл. 5);

$\tau$  – тривалість продувки, хв.

Таблиця 5 – Залежність коефіцієнта  $k_{\text{сум}}$  від інтенсивності продувки

|  |      |      |     |     |
|--|------|------|-----|-----|
| Інтенсивність продувки, м <sup>3</sup> /т·хв | 3    | 4    | 5   | 6   |
| Коефіцієнт $k_{\text{сум}}$                  | 1,85 | 2,12 | 2,5 | 2,9 |

### 3. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ.

3.1 Розрахувати кількість пилу, що утворюється при виробництві сталі конвертерним способом згідно вихідних даних, які наведені у табл. 6.

Таблиця 6 – Вихідні дані для розрахунку.

| Варіант | Кількість реакційних зон | Витрати кисню на одне сопло, м <sup>3</sup> /хв | Вміст заліза у конвертерному пилу на виході з горловини конвертера, % | Тривалість продувки, хв |
|---------|--------------------------|---|---|-------------------------|
| 1       | 3                        | 30  | 40  | 15                      |
| 2       | 5                        | 40  | 41  | 13                      |
| 3       | 6                        | 50  | 42  | 16                      |
| 4       | 3                        | 60  | 40  | 17                      |
| 5       | 4                        | 70  | 43  | 18                      |
| 6       | 5                        | 80  | 42  | 15                      |
| 7       | 6                        | 50  | 41  | 16                      |
| 8       | 3                        | 60  | 44  | 18                      |
| 9       | 4                        | 70  | 41  | 17                      |
| 10      | 5                        | 40  | 40  | 19                      |

3.2 Згідно індивідуального завдання, представленого у табл. 6, охарактеризувати принципові системи очистки викидів від забруднюючих речовин, що використовуються у різних типах виробництв металургійного комплексу. Обґрунтувати доцільність використання конкретного виду обладнання для уловлювання пилу та газоподібних забруднювачів.

Таблиця 7 – Варіант для виконання індивідуального завдання 3.2.

| Варіант | Завдання   |
|---------|--|
| 1       | Проаналізувати механічні системи очищення газових викидів у доменному та сталеплавильному виробництві.         |
| 2       | Охарактеризувати електрофільтри як засіб уловлювання пилу в процесах металургійного виробництва.               |
| 3       | Дослідити ефективність використання мокрого очищення газів у конвертерному виробництві сталі.                  |
| 4       | Порівняти циклони та рукавні фільтри для очищення пилових викидів у феросплавному виробництві.                 |
| 5       | Обґрунтувати доцільність використання скрубера Вентурі для очищення газових викидів металургійних підприємств. |
| 6       | Розглянути плазмохімічні методи очищення викидів у кольоровій металургії.                                      |
| 7       | Проаналізувати вплив комбінованих систем очищення газових викидів у виробництві чавуну та сталі.               |
| 8       | Оцінити ефективність хімічної нейтралізації газових викидів у металургійному виробництві.                      |
| 9       | Визначити доцільність застосування адсорбційних методів для очищення газоподібних забруднень у металургії.     |
| 10      | Дослідити сучасні методи очищення газових викидів від оксидів сірки та азоту в металургійному комплексі.       |

### Контрольні питання.

1. Які виробництва є джерелами викидів у металургійному комплексі? Назвіть потенційні джерела викидів діоксиду вуглецю як об'єктів моніторингу парникових газів.

2. Охарактеризуйте склад викидів, що утворюються у агломераційному виробництві.

3. Які компоненти входять у склад доменного газу? У яких процесах може використовуватись його тепло?

4. Наведіть оцінку сталеплавильного виробництва в цілому та мартенівського виробництва зокрема з точки зору забруднення повітряного басейну.

5. Який спосіб виплавки сталі є найбільш екологічним? Обґрунтуйте свою відповідь.

### Список літератури

1. Накемпій О. К. Оцінка впливу металургійної промисловості на стан атмосферного повітря та шляхи його зменшення. Проблеми

охорони праці в Україні, 2023. –39(1–2), 87–93. DOI: 10.36804/nndipbor.39-1-2.2023.87-93

2. Самойленко Н.М., Аверченко В.І., Байрачний В.Б. Системи технологій та промислова екологія. Ч.1. Металургійний та енергетичний комплекс: навч. посіб. для студентів спеціальності 101 «Екологія» / Н.М.Самойленко, В.І.Аверченко, В.Б.Байрачний. Харків : НТУ«ХП», Лідер, 2020.– 212 с.

3. Техноекологія: підручник / Мальований М.С., В.М. Боголюбов, Т.П. Шанина та ін.; за ред. М.С. Мальованого; Нац. Ун-т «Львівська політехніка». Херсон: Олдрі-Плюс, 2014. – 616 с.

4. Василенко І.А., Скиба М.І., Півоваров О.А., Воробйова В.І. Теоретичні основи охорони навколишнього середовища. Дніпро: Акцент ПП, 2017. – 204 с.

5. Зацеркляний М.М., Зацеркляний О.М., Столевич Т.Б. Процеси захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса : Фенікс, 2017. – 454 с.

6. Крусір Г. В., Мадані М.М., Гаркович О.Л. Техніка та технології очищення газових викидів [Електронний ресурс] : навч. посіб. Одеса : ОНАХТ, 2017. Електрон. текст. дані. 207 с.

7. Сучасні технології захисту атмосфери: навч. посіб. Для студентів вищих навчальних закладів екологічного профілю /Укл. Мартиненко С.А. Кропивницький: ЦНТУ, 2019.– 155 с.

### **ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3**

**Тема: Розрахунок викидів забруднюючих речовин, утворених при спалюванні твердого палива у котлоагрегатах.**

**Мета роботи:** ознайомитися з методикою розрахунку основних забруднюючих речовин, що утворюються під час спалювання вугілля у комунальних та промислових котельнях.

#### **1. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.**

Значну роль у споживанні твердого палива та забрудненні атмосферного повітря населених пунктів відіграє «мала енергетика», яка включає комунальні та промислові котельні. Шкідливими викидами в атмосферу під час спалювання палива є:

- частинки незгорілого палива;
- оксиди азоту NO та NO<sub>2</sub> (паливні, швидкі, термічні);
- оксиди сірки SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>;
- сажа (С);

- зола;
- продукти неповного згорання  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$ ,  $\text{H}_2$  тощо;
- канцерогенні речовини (1,2 бенз(а)пирен  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$  та інші).

В Україні всі сертифіковані котли та інші установки спалювання палива повинні відповідати екологічним показникам, у тому числі і по концентрації викидів  $\text{NO}_x$  та  $\text{CO}$ .

Кількість певної забруднюючої речовини, що поступає у викиди, залежить від виду палива, конструкції топків, а також пальників та пристроїв золоуловлювання. Крім того, важливим є вміст у паливі сірки та величина його зольності.

Серед методів зменшення утворення та надходження у повітряний басейн шкідливих викидів використовується попередня очистка палива; створення умов для придушення утворення забруднювачів та їх випалювання; застосування систем очистки викидів від шкідливих для довкілля речовин.

Метод шарового спалювання, який призначений для спалювання кускового палива, є досить розповсюдженим та використовується у котлоагрегатах різного типу. В шарових топках спалюється паливо з розмірами кусків 20-30 мм і більше. Для спалювання у котлоагрегатах використовуються енергетичні марки вугілля.

У теперішній час багато уваги приділяється ефективному використанню енергетичних ресурсів при їх спалюванні. Втрати тепла при роботі котлоагрегата пов'язані з багатьма причинами. Серед них при розрахунку викидів забруднюючих речовин враховують втрати теплоти від механічної та хімічної неповноти згорання палива. Величина втрати теплоти від механічної неповноти згорання палива коливається в межах – від 1–2% у великих камерних топках, та до 10–15% у малих установках. Втрати теплоти від хімічної неповноти згорання у топках раціональної конструкції складають 1 – 2 %.

## **2. РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ПРИ СПАЛЮВАННІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА.**

**Завдання.** Розглядається котельня, що працює на кам'яному вугіллі марки ДГ. Фактична витрата палива  $V_{\phi} = 1749,5 \text{ т/рік}$ . Котельня працює в опалювальний період  $T = 6816 \text{ год/рік}$ . Витрата тепла від механічної неповноти згорання  $q_4 = 8,1\%$ . Нижча теплота згорання палива  $Q_c = 24,702 \text{ МДж/кг}$ . Необхідно розрахувати валові

викиди газоподібних та твердих часток, які утворюються при згоранні вугілля. Результати будуть використанні з метою прогнозування і оцінки обсягів викидів забруднюючих речовин та у плануванні першочерговості природоохоронних заходів.

1. Розрахункову витрату палива  $V_p$  визначаємо за формулою:

$$V_p = V_\phi \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \text{ т/рік} \quad (1)$$

$$V_p = 1749,5 \cdot \left(1 - \frac{8,1}{100}\right) = 1607,79 \text{ т/рік}$$

2. Фактичну теплову потужність котла  $Q_{\text{факт}}$  по теплу, що веде у топку, знаходимо за формулою:

$$Q_{\text{факт}} = \frac{[V_p / (\frac{T}{3,6})]}{q_r}, \text{ МДж/кг} \quad (2)$$

$$Q_{\text{факт}} = \frac{[1607,79 / (\frac{6816}{3,6})]}{24,702} = 0,0344 \text{ МДж/кг}$$

3. Теплова напруга дзеркала горіння  $q_r$  при площі горіння  $F=5 \text{ м}^2$  складає:

$$q_r = \frac{Q_{\text{факт}}}{F}, \text{ МДж/м}^2 \quad (3)$$

$$q_r = \frac{0,0344}{5} = 0,00688 \text{ МДж/м}^2$$

### Викиди оксидів азоту

Питомий викид оксидів азоту  $D_{NO_x}$  у перерахунку на  $NO_2$  при шаровому спалюванні твердого палива визначаються за формулою:

$$D_{NO_x} = 0,11 \cdot \alpha_T \cdot \left(1 + 5,46 \cdot \left(\frac{100-R_6}{100}\right) \cdot (q_r \cdot Q_r) \cdot 0,25\right), \text{ г/МДж} \quad (4)$$

де  $\alpha_T$  – коефіцієнт надлишку повітря в топці,  $\alpha_T = 1,35$ ;

$R_6$  – характеристика гранулометричного складу вугілля,  $R_6 = 40\%$ .

$$D_{NO_x} = 0,11 \cdot 1,35 \cdot \left(1 + 5,46 \cdot \left(\frac{100-40}{100}\right) \cdot (0,00688 \cdot 24,702) \cdot 0,25\right) = 0,1692$$

г/МДж

Викид оксидів азоту  $M_{NO_x}$  розраховуємо за формулою:

$$M_{NO_x} = V_\phi \cdot Q_r \cdot D_{NO_x} \cdot K_p \cdot K_{\text{п}}, \text{ т/рік} \quad (5)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт, що враховує вплив рециркуляції димових газів,  $K_p=1$ ;

$K_{\text{п}}$  – коефіцієнт (для валового викиду),  $K_{\text{п}}=0,001$ ;

$$M_{NO_x} = 1749,5 \cdot 24,702 \cdot 0,1692 \cdot 1 \cdot 0,001 = 7,3122 \text{ т/рік}$$

### Викиди діоксиду сірки

Викиди діоксиду сірки  $M_{SO_x}$  у перерахунку на  $SO_2$  розраховують за формулою:

$$M_{SO_x} = 0,02 \cdot B_{\phi} \cdot S^P \cdot (1 - \eta_{SO_2}) \cdot (1 - \eta''_{SO_2}), \text{ т/рік} \quad (6)$$

де  $B_{\phi}$  – витрата палива, т/рік;

$S^P$  – вміст сірки у паливі на робочу масу, для валового вмісту,  $S^P = 1,62\%$ ;

$\eta_{SO_2}$  – частка оксидів сірки, що пов'язуються летючою золою у котлі,  $\eta_{SO_2} = 0,1$  (тип палива: вугілля інших родовищ).

$$M_{SO_x} = 0,02 \cdot 1749,5 \cdot 1,62 \cdot (1 - 0,1) \cdot (1 - 0,1) = 45,92 \text{ т/рік}$$

### Викиди оксиду вуглецю.

Валові викиди оксиду вуглецю  $M_{CO}$  розраховуються за формулою:

$$M_{CO} = 0,001 \cdot C_{CO} \cdot B_{\phi} \cdot (1 - \frac{q_4}{100}), \text{ т/рік} \quad (7)$$

де  $C_{CO}$  – вихід оксиду вуглецю при спалюванні палива;

$B_{\phi}$  – витрата палива, т/рік.

Вихід оксиду вуглецю при спалюванні палива визначається за формулою:

$$C_{CO} = q_3 \cdot R \cdot Q_T, \text{ кг/т} \quad (8)$$

де  $q_3$  – витрати тепла внаслідок хімічної неповноти згорання палива,  $q_3=2\%$ ;

$R$  – безрозмірна доля  $q_3$ , обумовлена наявністю продукту неповного згорання оксиду вуглецю. Для твердого палива  $R = 1$ ;

$Q_T$  – нижча теплота згорання палива, МДж/кг.

За формулою 2.8 розраховуємо:

$$C_{CO} = 2 \cdot 1 \cdot 24,702 = 49,4, \text{ кг/т}$$

Тоді, за формулою 2.7 викиди оксиду вуглецю за опалювальний період складають:

$$M_{CO} = 0,001 \cdot 49,4 \cdot 1749,5 \cdot (1 - \frac{8,1}{100}) = 79,425 \text{ т/рік}$$

### Викиди твердих часток.

Викид летючої золи  $M_z$  визначають за формулою:

$$M_z = 0,001 \cdot B_{\phi} \cdot A_p \cdot A_{вин} \cdot (1 - V_z), \text{ т/рік} \quad (9)$$

де  $A_p$  – зольність палива на робочу масу (для валового викиду),  $A_p=10,9\%$ ;

$A_{вин}$  – частка золи, яка відноситься з котла,  $A_{вин} = 0,6$ ;

$V_z$  – частка золи, що уловлюється із золоуловлювача,  $V_z = 0,76$ .

Валовий викид золи складає:

$$M_z = 0,001 \cdot 1749,5 \cdot 10,9 \cdot 0,6 \cdot (1 - 0,76) = 2,746 \text{ т/рік}$$

Кількість коксових залишків  $M_{кз}$  при спалюванні твердого палива розраховують за формулою:

$$M_{кз} = 0,001 \cdot V_{\phi} \cdot (1 - V_3) \cdot \left(\frac{q_4 \cdot Q_r}{32,68}\right), \text{ т/рік} \quad (10)$$

$$M_{кз} = 0,001 \cdot 1749,5 \cdot (1 - 0,76) \cdot \left(\frac{8,1 \cdot 24,702}{32,68}\right) = 2,57 \text{ т/рік}$$

*Примітка:* за використаним у даному розрахунку формулами аналогічний розрахунок проводиться у випадку визначення обсягів викидів у г/с.

### 3. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ.

З метою оцінки обсягів викидів забруднюючих речовин при плануванні природоохоронних заходів згідно табл. 1 визначити валові викиди забруднюючих речовин, які утворюються при згоранні вугілля енергетичних марок Г та ДГ.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку.

| Варіант | Фактична витрата палива, т/рік | Період роботи котельної, год/рік | Витрата тепла від неповноти згорання, % |          | Нижча теплота згорання палива, МДж/кг |
|---------|--------------------------------|----------------------------------|---|----------|---------------------------------------|
|         |                                |                                  | механічної                              | хімічної |                                       |
| 1       | 1090                           | 7464                             | 7,8                                     | 1        | 24,282                                |
| 2       | 1349                           | 6816                             | 8,3                                     | 2        | 25,539                                |
| 3       | 1170                           | 7464                             | 10,0                                    | 2        | 23,449                                |
| 4       | 1160                           | 7464                             | 9,1                                     | 1        | 23,027                                |
| 5       | 1250                           | 6816                             | 11,0                                    | 1        | 23,865                                |
| 6       | 1160                           | 6816                             | 9,7                                     | 2        | 24,282                                |
| 7       | 990                            | 7464                             | 7,9                                     | 1        | 23,446                                |
| 8       | 1260                           | 6816                             | 12,1                                    | 2        | 23,027                                |
| 9       | 1190                           | 7464                             | 8,9                                     | 2        | 22,190                                |
| 10      | 1200                           | 6816                             | 9,8                                     | 2        | 24,282                                |

### Контрольні питання.

1. Які шкідливі речовини містяться у викидах, що формуються під час спалювання палива?

2. Від чого залежить кількість утвореної забруднюючої речовини, що надходить у викиди?

3. Які методи застосовуються для зменшення викидів забруднюючих речовин при спалювання палива?

4. Охарактеризуйте марки вугілля, що використовуються для

спалювання у котлоагрегатах.

5. Які види втрат тепла включаються у розрахунок викидів забруднюючих речовин, утворених при спалюванні палива у котлоагрегатах?

### Література

1. Котельні установки : навч. посібник / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 185 с.

2. Малявіна О. М. Теплопостачання : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форм навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, освітньо-професійна програма «Теплогазопостачання і вентиляція» / О. М. Малявіна, В. А. Міланко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 147 с.

3. Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні палива: метод. рек. до викон. розрахункової роботи для студ. напрямів підготовки «Теплоенергетика» /Уклад: В.І Шкляр, В.В.Дубровська. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 32 с.

### ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4

**Тема: Технологічні процеси виробництва нітратної кислоти. Очищення «хвостових» газів.**

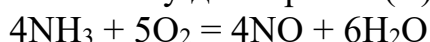
**Мета заняття:** ознайомитися з технологічними основами виробництва нітратної кислоти, вивчити джерела утворення забруднюючих речовин та способи очищення забруднених газів.

#### 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

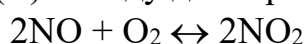
Нітратна кислота є однією з найважливіших мінеральних кислот та сильним окисником. Особливо сильна як окисник розбавлена нітратна кислота. В промисловості одержали застосування два сорти нітратної кислоти: розбавлена (з вмістом 50-60%  $\text{HNO}_3$ ) та концентрована (яка містить 96-98%  $\text{HNO}_3$ ).

В основі процесу одержання розбавленої нітратної кислоти з аміаку лежать наступні реакції:

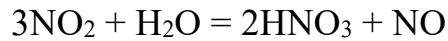
1. Контактне окиснення аміаку до нітроген (II) оксиду:



2. Окиснення нітроген (II) оксиду до нітроген (IV) оксиду:



3. Абсорбція нітроген (IV) оксиду водою:



Нітроген (II) оксид, який виділяється при цьому знову окиснюється.

Контактне окиснення є багатостадійним гетерогеннокаталітичним процесом, що відбувається у зовнішньодифузійній зоні, де швидкість реакції обмежується дифузією амоніаку до поверхні каталізатора. Функціональна схема синтезу наведена на рис. 1.

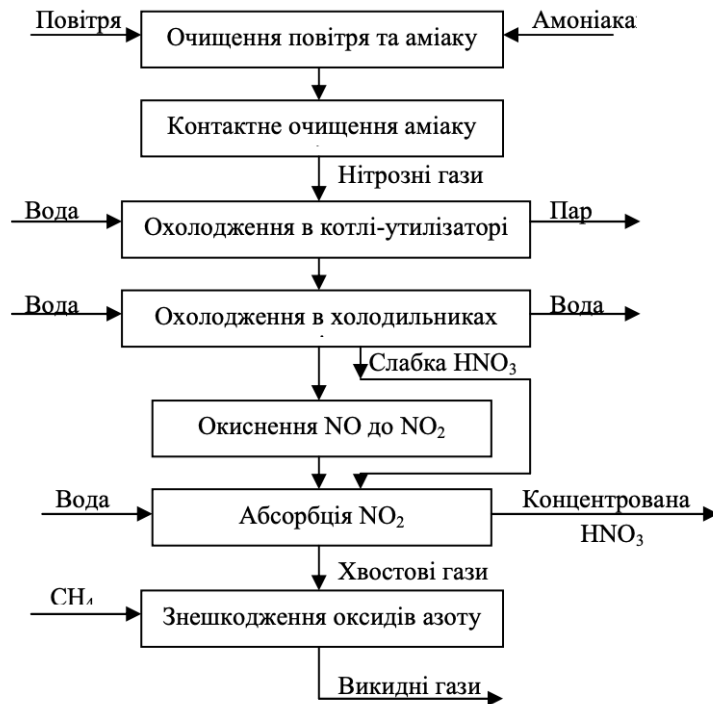


Рис. 1 – Функціональна схема виробництва нітратної кислоти [1].

У промисловості розведену нітратну кислоту отримують за трьома основними технологічними схемами, що працюють за різних тисків:

- під атмосферним тиском – характеризується меншими втратами платини, але має низьку продуктивність, громіздке обладнання, значні капіталовкладення та високі витрати амоніаку;
- під підвищеним тиском (0,2÷1 МПа);
- за комбінованою схемою, де окиснення амоніаку відбувається за атмосферного тиску, а окиснення NO та абсорбція NO<sub>2</sub> водою – за підвищеного.

Сучасне виробництво нітратної кислоти базується на другій і третій технологічних схемах. Вони функціонують за принципом енерготехнологічних систем, де енергія відхідних газів і теплота реакції окиснення ефективно використовуються для стискання повітря та нітрозних газів, а також для генерації пари.

На рис. 2 наведена принципова технологічна схема отримання нітратної кислоти під підвищеним тиском.

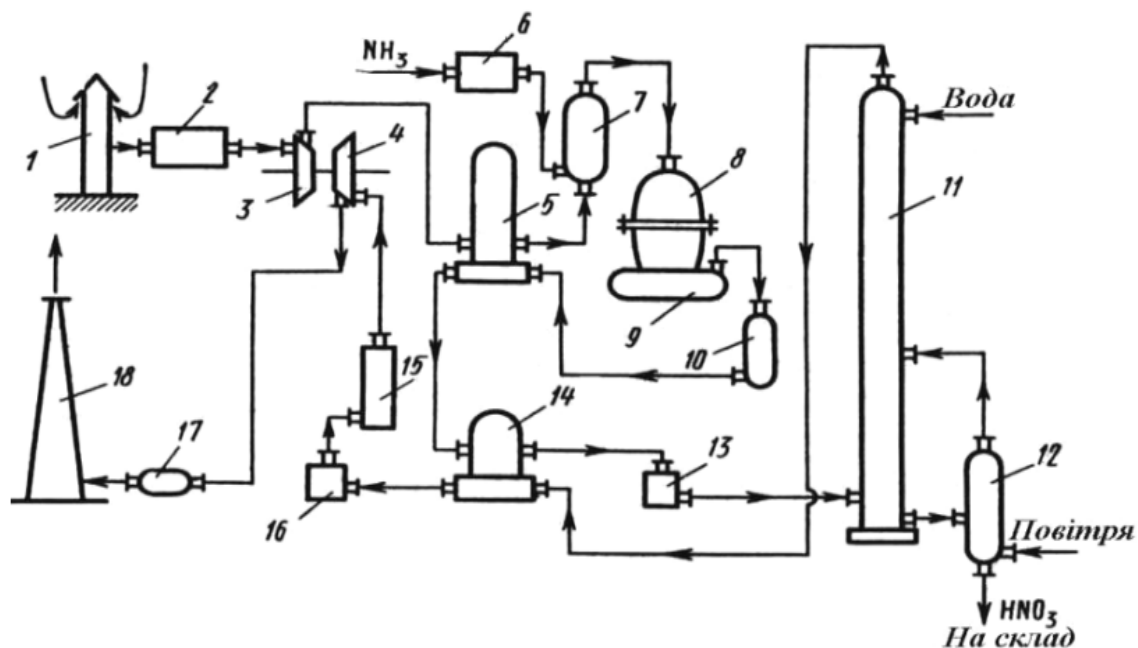


Рис. 2 – Схема виробництва розведеної нітратної кислоти під тиском 0,716 МПа [1]: 1 – повітрязабірна труба; 2 – повітроочишувач; 3 – газовий компресор; 4 – газова турбіна; 5 – повітропідігрівник; 6 – випарник амоніаку; 7 – змішувач з фільтром; 8 – контактний апарат; 9, 17 – котел-утилізатор; 10 – окиснювач з фільтром; 11 – абсорбційна колона; 12 – віддувна колона; 13 – холодильник-конденсатор; 14 – підігрівник хвостових газів; 15 – реактор каталітичного очищення; 16 – камера згоряння; 18 – вихлопна труба.

Очищене атмосферне повітря стискається в компресорі 3 ( $P = 0,73$  МПа,  $t = 135^{\circ}\text{C}$ ) і нагрівається в теплообміннику 5 до  $250^{\circ}\text{C}$ . У змішувачі 7 воно з'єднується з амоніаком із випарника 6, утворюючи амоніачно-повітряну суміш, яка подається в контактний апарат 8. Тут при  $\approx 900^{\circ}\text{C}$  на платино-родієвому каталізаторі амоніак окиснюється до нітрозних газів ( $9\div 9,5\%$  NO).

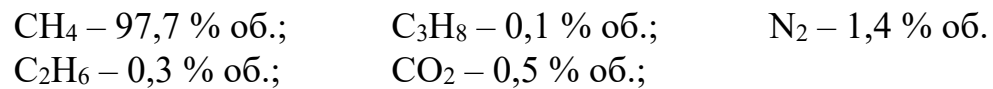
Газ охолоджується в котлі-утилізаторі 9, виробляючи пару, потім у окиснювачі 10 перетворюється на  $\text{NO}_2$ . Далі він проходить через теплообмінники 5, 14 і холодильник-конденсатор 13, охолоджується до  $45^{\circ}\text{C}$  і надходить в абсорбційну колону 11, де взаємодіє з водою. Готова нітратна кислота потрапляє у віддувну колону 12, де видаляються розчинені нітрозні гази.

Ступінь перетворення амоніаку в нітратну кислоту сягає 60–62%, а концентрація кислоти після відгонки – 68%. Для подальшого концентрування використовують абсорбенти води, такі як сульфатна кислота або нітрат магнію.

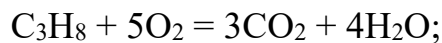
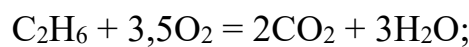
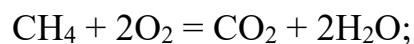
## 2. МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС ВУЗЛА КАТАЛІТИЧНОЇ ОЧИСТКИ «ХВОСТОВИХ» ГАЗІВ

### 2.1 Розрахунок камери згоряння

Склад природного газу, що надходить на спалювання:



Визначимо кількість кисню повітря, необхідного для спалювання  $1\text{ м}^3$ .



$$V_{\text{O}_2} = 2 \cdot 0,977 + 3,5 \cdot 0,003 + 5 \cdot 0,001 = 1,976 \text{ м}^3$$

При коефіцієнті надлишку повітря, що дорівнює 1,0, кількість азоту в повітрі становить:

$$V_{\text{N}_2} = 1,976 \cdot 79/21 = 7,434 \text{ м}^3$$

Кількість компонентів топкових газів складає:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,977 + 2 \cdot 0,003 + 3 \cdot 0,001 + 0,005 = 0,991 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot 0,977 + 3 \cdot 0,003 + 4 \cdot 0,001 = 1,967 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,014 + 7,434 = 7,448 \text{ м}^3$$

Кількість природного газу, що додається до хвостового газу, за співвідношення «природний газ-кисень», що дорівнює 0,55 складає:

$$V_{\text{CH}_4} = 1151,3 \cdot 0,55 = 633,2 \text{ м}^3$$

Кількість тепла, необхідного для нагрівання природного газу до  $400^\circ\text{C}$  (приймаємо теплоємність природного газу, що дорівнює середній теплоємності метану  $51,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$ ):

$$1 \text{ кмоль} - 22,4 \text{ м}^3$$

$$x - 633,2 \text{ м}^3$$

$$x = 28,3 \text{ кмоль}$$

$$28,3 \cdot 51,8 \cdot (400 - 20) = 557057 \text{ кДж}$$

Кількості тепла, необхідного для нагрівання хвостових газів зі  $120^\circ\text{C}$  до  $400^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} & (2,3 \cdot 31,74 + 51,4 \cdot 30,3 + 1990,5 \cdot 30,3 + 11,7 \cdot 30,0) \cdot (400 - 120) = \\ & = 17442200 \text{ кДж} \end{aligned}$$

де середні мольні теплоємності ( $\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$ ):

$$\begin{array}{ll} \text{NO} \dots 31,74 & \text{O}_2 \dots 30,3 \\ \text{H}_2\text{O} \dots 30,0 & \text{N}_2 \dots 30,3 \end{array}$$

Найнижча теплотворна здатність природного газу складає:

$$0,977 \cdot 35816 + 0,003 \cdot 67520 + 0,001 \cdot 95883 = 35290 \text{ кДж/нм}^3,$$

де 35816, 67520, 95883 – теплотворна здатність відповідно метану, етану і пропану, кДж/нм<sup>3</sup>.

Тепло повітря при 135°C складає:

$$\left(\frac{1,976}{22,4} + \frac{7,434}{22,4}\right) \cdot 29,3 \cdot 135 = 1661,31 \text{ кДж},$$

де 29,3 – середня теплоємність повітря, кДж/(кмоль·К).

Тепло природного газу на спалювання при 20°C 1нм<sup>3</sup>

$$Q = \frac{1}{22,4} \cdot 46,1 \cdot 20 = 41,5 \text{ к Дж}$$

Кількість тепла, що виділяється під час спалювання 1 нм<sup>3</sup> природного газу:

$$35290 + 1661,31 + 41,5 = 36992,81 \text{ кДж}$$

Кількість тепла продуктів горіння природного газу за 400°C:

$$\left(\frac{0,991}{22,4} \cdot 48,6 + \frac{1,967}{22,4} \cdot 30 + \frac{7,448}{22,4} \cdot 30,3\right) \cdot 400 = 5939,36 \text{ кДж},$$

де 48,6; 30,0; 30,3 – середня теплоємність відповідно CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, кДж/(кмоль·К).

Кількість тепла, що віддається продуктами згорання 1 нм<sup>3</sup> природного газу при охолодженні до 400°C:

$$36992,81 - 5939,36 = 31053,45 \text{ кДж}$$

Кількість природного газу, що подається в камеру горіння:

$$\frac{557057+17442200}{31053,45} \approx 580 \text{ нм}^3$$

Тоді, кількість кисню на спалювання:

$$V_{\text{O}_2} = 1,976 \cdot 580 = 1146,1 \text{ м}^3$$

Кількість азоту з повітрям:

$$V_{N_2} = 7,434 \cdot 580 = 4311,7 \text{ м}^3$$

Кількість утвореного CO<sub>2</sub> під час спалювання:

$$V_{CO_2} = 0,991 \cdot 580 = 574,8 \text{ м}^3$$

$$V_{CO_2} = 574,8 + 3,1 + 2,9 = 580,8 \text{ м}^3$$

Кількість утвореного H<sub>2</sub>O при спалюванні:

$$V_{H_2O} = 1,967 \cdot 580 = 1140,9 \text{ м}^3$$

$$V_{CO_2} = 1140,9 + 262,5 = 1403,4 \text{ м}^3$$

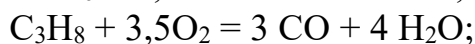
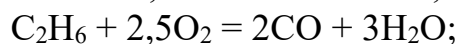
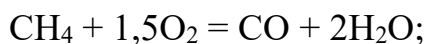
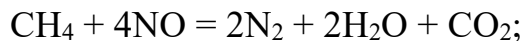
Матеріальний баланс камери згоряння представлений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Матеріальний баланс камери згоряння.

| Прихід   |                 |        |         |         | Витрата                                   |                 |        |         |       |  |
|--|-----------------|--------|---------|---------|---|-----------------|--------|---------|-------|--|
| Стаття   | нм <sup>3</sup> | кмоль  | кг      | %об.    | Стаття                                    | нм <sup>3</sup> | кмоль  | кг      | %об.  |  |
| 1.Хвостовий газ, зокрема:<br>NO<br>O <sub>2</sub><br>N <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub> O  |                 |        |         |         | Хвостовий газ на вхід у реактор, зокрема: |                 |        |         |       |  |
|  |                 | 52,2   | 2,0     | 69,6    |   | 0,1             |        |         |       |  |
|  |                 | 1151,3 | 50,0    | 1644,2  |   | 2,5             |        |         |       |  |
|  |                 | 44586  | 1955,0  | 55729,3 |   | 96,9            |        |         |       |  |
|  | Разом           | 46052  | 2018,0  | 57653,6 |   | 100,0           |        |         |       |  |
| 2.Природний газ для відновлений з оксидів азоту, у тому числі:<br>CH <sub>4</sub><br>C <sub>2</sub> H <sub>6</sub><br>C <sub>3</sub> H <sub>8</sub><br>CO <sub>2</sub><br>N <sub>2</sub> |                 |        |         |         | NO  | 52,2            | 2,0    | 69,6    |       |  |
|  |                 |        |         |         | O <sub>2</sub>                            | 1151,3          | 50,0   | 1644,3  | 0,09  |  |
|  |                 |        |         |         | CH <sub>4</sub>                           | 618,0           | 25,402 | 441,9   | 2,2   |  |
|  |                 |        |         |         | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>             | 1,9             | 0,078  | 2,5     | 1,103 |  |
|  |                 |        |         |         | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>             | 0,6             | 0,026  | 1,2     | 0,003 |  |
|  |                 |        |         |         | CO <sub>2</sub>                           | 580,8           | 24,82  | 1140,9  | 0,001 |  |
|  |                 |        |         |         | N <sub>2</sub>                            | 48922,9         | 2140,7 | 61153,6 | 94,0  |  |
|  |                 |        |         |         | H <sub>2</sub> O                          | 1403,4          | 59,95  | 1127,7  | 2,603 |  |
|  | Разом           | 633,1  | 26,0    | 462,8   | 100,0                                     |                 |        |         |       |  |
| 3.Природний газ на спалювання, у тому числі:<br>CH <sub>4</sub><br>C <sub>2</sub> H <sub>6</sub><br>C <sub>3</sub> H <sub>8</sub><br>CO <sub>2</sub><br>N <sub>2</sub>                   |                 |        |         |         |   |                 |        |         |       |  |
|  |                 | 566,7  | 24,32   | 440     | 97,7                                      |                 |        |         |       |  |
|  |                 | 1,74   | 0,076   | 2,3     | 0,3                                       |                 |        |         |       |  |
|  |                 | 0,58   | 0,022   | 0,97    | 0,1                                       |                 |        |         |       |  |
|  |                 | 2,9    | 0,134   | 5,9     | 0,5                                       |                 |        |         |       |  |
|  |                 | 8,12   | 0,348   | 9,74    | 1,4                                       |                 |        |         |       |  |
| Разом  | 580,0           | 24,9   | 458,9   | 100,0   |   |                 |        |         |       |  |
| 4.Повітря, зокрема:<br>O <sub>2</sub><br>N <sub>2</sub>  |                 |        |         |         |   |                 |        |         |       |  |
|  |                 | 1146,1 | 49,0    | 1637,3  | 21,0                                      |                 |        |         |       |  |
|  |                 | 4311,7 | 185,0   | 5389,7  | 79,0                                      |                 |        |         |       |  |
|  | Разом           | 5457,8 | 234,0   | 7027    | 100,0                                     |                 |        |         |       |  |
| Всього   | 52722,9         | 2302,9 | 65583,5 | -       |   |                 |        |         |       |  |

## 2.2. Розрахунок реактора каталітичного очищення

При каталітичному відновленні у відновлювальному середовищі протікають такі реакції:



Приймаємо ступінь відновлення оксиду азоту рівним 95%. Тоді кількість оксиду азоту, що залишився складає:

$$52,2 \cdot (1 - 0,95) = 2,61 \text{ м}^3$$

Визначимо витрату  $\text{CH}_4$ , що пішла на реакцію відновлення:

$$V_{\text{CH}_4} = 52,2 \cdot 0,95 / 4 = 12,4 \text{ м}^3$$

Визначимо залишок  $\text{CH}_4$ :

$$V_{\text{CH}_4} = 618,6 - 12,4 = 606,2 \text{ м}^3$$

Кількість кисню, що витрачається на окислення вуглеводневих компонентів газу:

$$V_{\text{O}_2} = 1,5 \cdot 606,2 + 2,5 \cdot 1,9 + 3,5 \cdot 0,6 = 916,3 \text{ м}^3$$

Залишок кисню:

$$1151,3 - 916,3 = 235 \text{ м}^3$$

Кількість утвореного оксиду вуглецю:

$$V_{\text{CO}} = 606,2 + 2 \cdot 1,9 + 3 \cdot 0,6 = 611,9 \text{ м}^3$$

З нього утворилося (за залишком  $\text{O}_2$ )  $\text{CO}_2$ :

$$V_{\text{CO}_2} = 235 \cdot 2 = 470 \text{ м}^3$$

Кількість оксиду вуглецю, що залишився:

$$V_{\text{CO}} = 611,9 - 470 = 141,9 \text{ м}^3$$

Кількість утворених:

діоксиду вуглецю

$$12,4 + 470 + 580,8 = 1063,2 \text{ м}^3$$

азоту за першою реакцією:

$$(52,2 \cdot 0,95) / 2 = 24,8 \text{ м}^3$$

Всього  $V_{\text{N}_2} = 24,8 + 48922,9 = 48947,7 \text{ м}^3$

Пари води за першою реакцією:

$$(52,2 \cdot 0,95) / 2 = 24,8 \text{ м}^3$$

За іншими реакціями:  $2 \cdot 606,2 + 3 \cdot 1,9 + 4 \cdot 0,63 = 1220,6 \text{ м}^3$ ,

Всього  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 24,8 + 1220,6 + 1403,4 = 2646,8 \text{ м}^3$

Склад хвостових газів після каталітичного очищення представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Склад хвостових газів після каталітичного очищення

|                  | м <sup>3</sup> | кмоль   | кг      | %об.  |
|------------------|----------------|---------|---------|-------|
| NO               | 2,61           | 0,1     | 3,5     | 0,005 |
| CO               | 141,9          | 6,3     | 177,4   | 0,27  |
| CO <sub>2</sub>  | 1063,2         | 47,5    | 2088,4  | 2,01  |
| N <sub>2</sub>   | 48947,8        | 2141,7  | 61184,6 | 92,7  |
| H <sub>2</sub> O | 2648,8         | 118,3   | 2128,5  | 5,02  |
| Всього           | 52804,2        | 2303,24 | 65588,4 | 100   |

### 3. ЗАВДАННЯ.

1. Охарактеризувати способи очищення «хвостових» газів.
2. Проаналізувати технологічні процеси виробництва нітратної кислоти.
3. Дослідити методи концентрування нітратної кислоти та їх ефективність.
4. Порівняти технологічні схеми виробництва нітратної кислоти за різних тисків.

#### *Контрольні питання*

1. Основні стадії виробництва нітратної кислоти та їх характеристика.
2. Методи очищення «хвостових» газів, що застосовуються у виробництві нітратної кислоти.
3. Вплив тиску на технологічні процеси виробництва нітратної кислоти.

#### **Література**

1. Яцков М. В. , Корчик Н. М. , Пророк О. А. Основні технологічні схеми базових неорганічних виробництв: навч. посібник. – Рівне : НУВГП, 2020. – 212 с.
2. Беженар В.П. Хімія і технологія неорганічних речовин: навчально-методичний посібник. – Івано-Франківськ: Вид-во Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2011. – 217 с.

### **ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №5**

**Тема: Технологічні та екологічні аспекти виробництва сульфатної кислоти.**

**Мета заняття:** ознайомитися з технологічними основами виробництва сульфатної кислоти, вивчити джерела утворення забруднюючих речовин та способи очищення забруднених газів.

## 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.

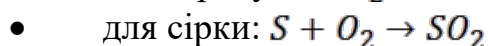
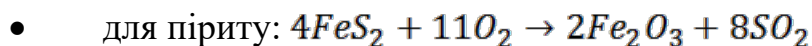
Сульфатна (сірчана) кислота – одна з найважливіших хімічних сполук, що широко використовується в промисловості, зокрема, у виробництві мінеральних добрив, органічного синтезу, металургії, нафтохімії та інших галузях. Вона є основним індикатором розвитку хімічної промисловості, оскільки її споживання прямо пов'язане з рівнем промислового виробництва.

Виробництво сульфатної кислоти базується на окисненні сірковмісних сполук (піриту, сірки, сірководню, відходів металургійного виробництва), що супроводжується утворенням діоксиду сірки ( $SO_2$ ). Далі цей газ піддається каталітичному окисненню до триоксиду сірки ( $SO_3$ ) і поглинається водою або концентрованою кислотою з утворенням олеуму або безпосередньо сульфатної кислоти.

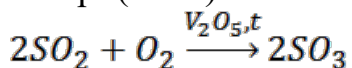
Виробництво  $H_2SO_4$  здійснюється за контактним методом, що включає кілька основних стадій: випалювання сірковмісної сировини, окиснення діоксиду сірки, поглинання триоксиду сірки та отримання кінцевого продукту.

Основні хімічні реакції процесу:

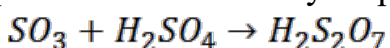
1) Випалювання піриту ( $FeS_2$ ) або спалювання елементарної сірки:



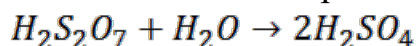
2) Окиснення діоксиду сірки ( $SO_2$ ) до триоксиду сірки ( $SO_3$ ) на каталізаторі ( $V_2O_5$ ):



3) Поглинання триоксиду сірки ( $SO_3$ ) концентрованою сульфатною кислотою з утворенням олеуму ( $H_2S_2O_7$ ):



4) Розбавлення олеуму водою для отримання сульфатної кислоти необхідної концентрації:



Якщо триоксид сірки поглинається водою безпосередньо, реакція протікає з утворенням туману сульфатної кислоти:  $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ , тому цей спосіб рідко використовується.

Контактний метод виробництва сульфатної кислоти з колчедану передбачає очищення випалювального газу від пилу та шкідливих домішок. Очищений газ, що містить діоксид сірки, спрямовується на каталізатор, де відбувається його окиснення до триоксиду сірки. Далі триоксид сірки взаємодіє з водою, утворюючи сульфатну кислоту. Залежно від співвідношення  $SO_3$  та води отримують водний розчин сульфатної кислоти або олеум.

Технологічна схема виробництва сульфатної кислоти приведена на рис. 1.

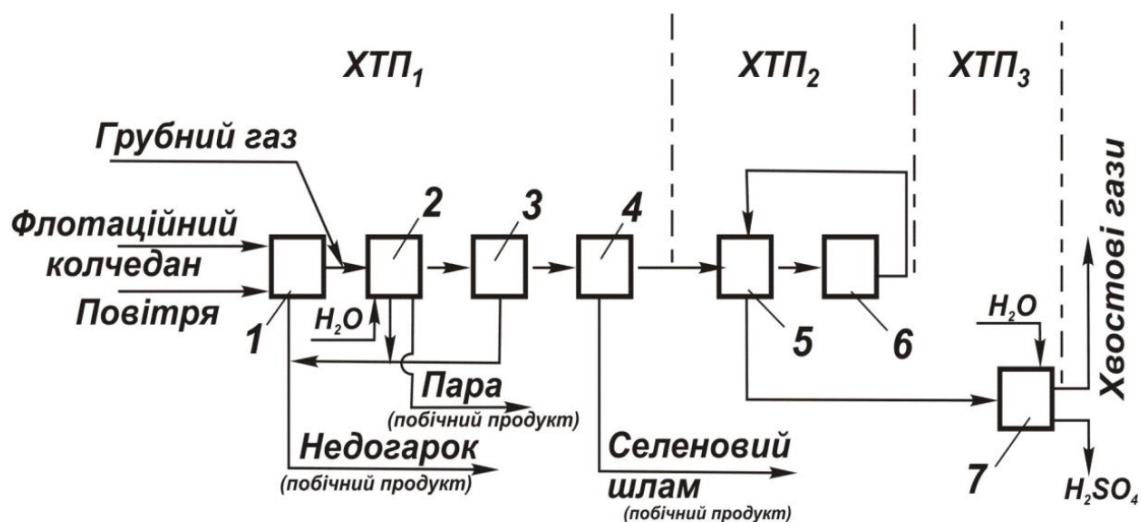


Рис. 1 – Технологічна схема виробництва сульфатної кислоти контактним методом з колчедану

1 – випалювання флотаційного колчедану; 2 – охолодження випалювального газу в котлі-утилізаторі; 3 – очищення газу від пилу; 4 – промивання та сушка газу; 5 – теплообмін між потоками газу; 6 – окиснення  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_3$  на каталізаторі; 7 – абсорбція  $\text{SO}_3$  з утворенням сульфатної кислоти (ХТП 1 – одержання  $\text{SO}_2$ ; ХТП 2 – окиснення  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_3$ ; ХТП 3 – утворення  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Випалювальні газу з печей містять пилові частинки, що захоплюються газовим потоком у процесі випалювання сировини. Концентрація пилу в газах залежить від якості сировини, її гранулометричного складу, конструкції печей та інших факторів. Запиленість газів при випалюванні колчедану в механічних печах становить 1–10 г/м<sup>3</sup>, у печах пилоподібного випалювання – 20–100 г/м<sup>3</sup>, а в печах киплячого шару – до 300 мг/м<sup>3</sup> (усі значення наведені для нормальних умов).

В табл. 1 представлено орієнтовний вміст пилу у газі на різних ділянках грубого відділення, оснащеного печами киплячого шару для спалювання флотаційного колчедану.

Таблиця 1 – Вміст пилу у газі на різних ділянках грубого відділення

| Ділянка грубого відділення | Вміст пилу у газі, г/м <sup>3</sup> |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Після печі КШ              | 300                                 |
| Після котла-утилізатора    | 200                                 |
| Після циклонів             | 20                                  |
| Після електрофільтрів      | 0,05                                |

Пил випалювальних газів за хімічним складом майже не відрізняється від недогарка. Його ретельне видалення необхідне для запобігання засміченню апаратури, зменшення гідравлічного опору трубопроводів і апаратів, запобігання забрудненню продукційної кислоти.

На різних етапах виробництва  $H_2SO_4$  утворюється туман сульфатної кислоти, який спричиняє корозію обладнання та погіршення якості продукції. Туман є дисперсною системою, що складається з дрібних крапель рідини, зважених у газів; а також аерозолів (туман, дим, пил), які мають унікальні властивості, пов'язані з великою питомою поверхнею тонкодисперсних частинок, що підвищує їхню поверхневу енергію.

Основні характеристики аерозолів визначаються їхньою дисперсністю:

- високодисперсний туман містить краплі радіусом менше 0,1 мкм, звичайний туман – від 0,1 до 10 мкм;
- бризки – понад 10 мкм.

Туман може утворюватися двома основними шляхами:

1. Механічне дроблення рідини – розпад рідких частинок під впливом турбулентності та інших механічних факторів.
2. Конденсація пари – формування крапель внаслідок конденсації парів у газовій суміші, що не конденсується (конденсаційний туман).

## **2. ОЧИСТКА ЗАБРУДНЕНИХ ГАЗІВ ВИРОБНИЦТВА СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ.**

Очищення газу від пилу здійснюється у два етапи: грубе та тонке очищення.

*Грубе очищення* відбувається після котла-утилізатора, коли газ надходить до циклона. У цьому процесі основна частина пилу осідає, що знижує його вміст у газі до 10–20 г/м<sup>3</sup>.

*Тонке очищення* виконується після циклона, коли газ спрямовується до сухого електрофільтра. На цьому етапі досягається значно вища ефективність очищення, зменшуючи вміст пилу в газі до 0,05–0,1 г/м<sup>3</sup>.

Очищення випалювального газу від твердих частинок і газоподібних домішок є важливим етапом у виробництві сульфатної кислоти, оскільки дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин і підвищити ефективність процесу. На першому етапі газ проходить через промивну башту, де орошується 50–60%-м розчином сульфатної кислоти, що сприяє його охолодженню та конденсації основних домішок, таких як  $SO_2$ ,  $As_2O_3$ ,  $SeO_2$ ,  $TeO_2$  у вигляді туману. Далі він надходить у другу промивну башту, де обробляється 15–25%-м розчином сульфатної кислоти, що забезпечує додаткове осадження аерозолів.

Для видалення сірчанокислотного туману, який після другої промивної башти містить близько 95% залишкових частинок, газ

спрямовують у мокрі електрофільтри, а потім у сушильні вежі для зниження вмісту вологи, який на виході не повинен перевищувати 0,01–0,02% (об.) або 0,08–0,15 г/м<sup>3</sup>, а концентрація сірчаної кислоти, що виходить із вежі, не повинна зменшуватися більш ніж на 0,5%. Очищення газу від сірчаноокислотного туману є актуальною проблемою, оскільки 90% частинок у ньому мають розмір  $\leq 1$  мкм, а традиційні електрофільтри, хоча й використовуються для цього, мають значні недоліки, зокрема велику матеріаломісткість (до 900 тонн), низьку надійність і зниження ефективності при малій концентрації частинок.

Сучасні методи очищення передбачають використання рукавних фільтрів із фторопластовими, скловолокнистими, базальтовими та вуглеграфітовими матеріалами, проте більшість підприємств використовує застарілі системи газоочистки, де основний фільтруючий елемент – рукавний фільтр, і покращення якості очищення можливе лише шляхом заміни фільтрувального матеріалу на сучасніші зразки.

Зниження викидів діоксиду сірки більш ніж у 50 разів забезпечує система ДК-ДА, суть якої полягає в тому, що після абсорбції газ повертається на повторне контактування. На таких установках ступінь окиснення SO<sub>2</sub> у SO<sub>3</sub> досягає 99,995%, що значно підвищує ефективність очищення газів. Це дозволяє не лише зменшити забруднення атмосфери, а й підвищити ресурсоефективність виробництва сульфатної кислоти. Використання цієї технології в поєднанні з сучасними фільтрувальними матеріалами та вдосконаленими методами осадження аерозолів може суттєво покращити якість очищення газових викидів.

### **3. ПЕРЕРобКА ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ.**

#### **3.1 Вилучення кольорових металів з огарків.**

Переробка відходів виробництва сульфатної кислоти передбачає вилучення кольорових металів із піритних огарків, що містять мідь, цинк, свинець та інші цінні компоненти. Основними методами є хлоруюче і сульфатизуюче випалювання, які дозволяють не тільки вилучити до 90% міді та значну частку благородних металів, а й забезпечити знесірчення огарку. Перед випалюванням до шихти додають NaCl, що сприяє утворенню розчинного CuCl<sub>2</sub>, який потім вилуговують гарячою водою, а мідь осаджують залізним скрапом. Впроваджуються також прогресивні процеси хлоридної сублімації, де огарки обробляють HCl у киплячому шарі, що дозволяє виділити хлориди важких металів та отримати оксид заліза, придатний для доменної плавки. Важливим етапом є селективне хлорування при підвищених температурах, яке дозволяє виділити мідь, цинк, свинець та інші елементи, після чого очищені залізовмісні залишки

агломерують та направляють на металургійну переробку. Застосування цих методів забезпечує високий ступінь вилучення кольорових металів, ефективно використання відходів та мінімізацію екологічного впливу.

### **3.2 Використання огарків у доменному виробництві.**

Використання піритних огарків у доменному виробництві передбачає їхню підготовку через агломерацію, що сприяє видаленню сірки та отриманню кускового матеріалу, придатного для виплавки чавуну та сталі. Основними перешкодами для прямого використання огарків є їхній дрібний розмір, вміст шкідливих домішок (Pb, Cu, Zn, As) і залишкова сірка (1–3,5%). Агломерація здійснюється у безперервнодіючих установках шляхом просмокування повітря через шар спікливої шихти, що містить огарки та паливо (кокс, вугілля). Процес включає підготовку шихти, запалювання, спікання з вигоранням сірки, грохочення та охолодження агломерату, який надалі використовується в доменній плавці. Економічно доцільним є будівництво великих агломераційних установок при металургійних заводах, де разом з огарками можуть перероблятися й інші залізовмісні відходи. Для підвищення якості сировини огарки з бідних руд (35–39% Fe) можна збагачувати магнітною сепарацією, отримуючи концентрат із вмістом Fe до 66,5 % та мінімальним рівнем сірки.

### **3.3 Виробництво пігментів з огарків і огаркового пилу.**

Виробництво мінеральних пігментів із піритних огарків і огаркового пилу дозволяє отримувати залізний сурик, охру, що використовуються в лакофарбовій промисловості. Традиційна технологія передбачає обробку огарків сірчаною кислотою, що спричиняє залишковий вміст сірки, неприйнятний для покриття металевих поверхонь. Альтернативний метод виключає кислотну обробку та передбачає просіювання, промивку гарячою водою, сушіння та обпалювання огарків при 850-900 °С, що зменшує вміст сірчаних сполук. Огарковий пил із сухих електрофільтрів містить більше водорозчинних солей заліза, що ускладнює його використання, але дає змогу отримувати жовту охру та мумію через реакцію з глиною та вапном, сушіння і подальший випал при 800-900 °С. Отримані пігменти мають стабільний колір, не змінюються з часом, а фарби на їхній основі характеризуються високою якістю та стійкістю.

### **3.4 Інші напрямки використання огарків.**

Піритні огарки знаходять застосування в різних галузях промисловості, зокрема, у виробництві будівельних матеріалів, де вони використовуються як добавка до шихти для виготовлення цементу. У сільському господарстві огарки застосовують як добриво, що містить мідь. У менш значних обсягах вони застосовуються у кольоровій металургії як

залізовмісні флюси, у виробництві будівельних матеріалів як залізисті барвники, у виготовленні інсектицидів та в інших галузях, однак їхнє споживання залишається незначним порівняно з наявними ресурсами.

### **3.5 Вилучення селену зі шламів.**

Селен є цінним елементом, який супутньо вилучається в процесі випалювання колчедану при виробництві сульфатної кислоти. Ступінь вилучення селену з колчедану може значно варіюватися (від 30 до 60%) і визначається конструктивними особливостями та режимом роботи випалювальних печей, а також параметрами функціонування системи газоочищення.

## **4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ.**

1. Проаналізувати технологічну схему виробництва сульфатної кислоти та джерела утворення забруднюючих речовин. Привести їх характеристику та визначити негативний вплив на довкілля, який вони здійснюють.
2. Охарактеризувати апарати очищення забруднених газів від пилу та аерозолів, що використовуються у системах очистки.
3. Розглянути відходи сульфатного виробництва та напрямки їх рециклінгу.

## **5. ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ.**

1. Представити схему очищення газів від туману сульфатної кислоти у сполученні з технологічним обладнанням.
2. Охарактеризувати процес вилучення селену з випалювального газу у виробництві сульфатної кислоти. Зазначити сферу застосування селену, отриманого у даному процесі.

### **Контрольні питання**

1. Технологічне значення очищення випалювальних газів у виробництві сульфатної кислоти.
2. Основні продукти та побічні відходи, утворені у виробництві сульфатної кислоти.
3. Стандарти вимоги, що висуваються до якості отриманої сульфатної кислоти.
4. Методи отримання мінеральних пігментів з огарків і огаркового пилу.
5. Галузі застосування піритних огарків.
6. Технологічні процеси забезпечення вилучення селену зі шламів у виробництві сульфатної кислоти.

## Література

1. Іванченко, Л. В. Технологія сульфатної кислоти : навч. посібник / Л. В. Іванченко, В. Я. Кожухар, І. І. Усатюк ; Держ. ун-т «Одес. Політехніка». – Одеса, 2021. – 196 с.
2. Яворський В. Технологія сірки і сульфатної кислоти: підручник для студентів вищих навч. закл. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2010.– 404 с.
3. Кожухар В.Я., Іванченко Л.В., Шамшурін О.В., Попова І.М. Сульфатна кислота: навчальний посібник для студентів хіміко-технологічних спеціальностей. Одеса: «Сімекс-принт», 2012.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №6

### Тема: Способи культивування мікроорганізмів.

**Мета заняття:** ознайомитися зі способом культивування мікроорганізмів, зокрема, дріжджів на n-парафінах, а також провести розрахунок питомої витрати субстрату в процесі безперервного вирощування.

### 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.

Для вирощування (культивування) мікроорганізмів застосовують два методи – поверхневий і глибинний, які реалізуються переважно в аеробних умовах. Вибір способу залежить від кінцевої мети культивування: це або накопичення біомаси, або отримання певного продукту життєдіяльності мікроорганізму (метаболізму).

Технологія вирощування мікроорганізмів *поверхневим методом* полягає в тому, що мікроорганізми культивують на поверхні твердих або рідких живильних середовищ. Як тверді живильні середовища використовують агаризовані середовища або сипучі субстрати (пшоно, ячмінь, пшеничні висівки тощо). Вирощування мікроорганізмів за оптимальних умов триває протягом кількох днів. Після завершення процесу вирощування мікроорганізмів виділяють кінцевий продукт. Процес вирощування мікроорганізмів поверхневим способом закінчується за певний період часу і тому є періодичним.

Вирощування мікроорганізмів *глибинним методом* відбувається в усьому об'ємі рідкого поживного середовища в спеціальному апараті – ферментаторі (рис. 1). Вирощування мікроорганізмів

глибинним методом може бути періодичним і безперервним (проточним).

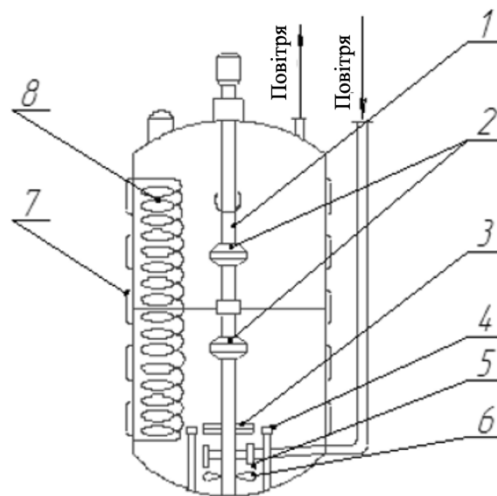


Рис. 1 – Пристрій ферментатора:

1 – вал; 2, 3, 6 – мішалки; 4 – статор; 5 – барботер, 7 - сорочка, 8 – змійовик

Періодичний метод глибинного культивування полягає в тому, що у ферментатор завантажують одразу весь об'єм живильного середовища і вносять посівний матеріал. Суміш живильного середовища і мікроорганізмів, що ростуть у ньому, називають *культуральною рідиною*. Оскільки мікроорганізми можуть утилізувати тільки розчинений у воді кисень, а розчинність кисню у воді невелика, то для забезпечення росту аеробних мікроорганізмів їх необхідно насичити киснем. Процес підведення кисню вглиб рідкого середовища називається *аеруванням*.

Вирощування мікроорганізмів проводять в оптимальних умовах протягом певного часу, після чого процес зупиняють, зливають вміст ферментатора і виділяють цільовий продукт.

Безперервний метод глибинного культивування полягає в тому, що поживне середовище безперервно подають у ферментатор, у якому створюють оптимальні умови для росту мікроорганізмів, а з ферментатора безперервно витікає культуральна рідина разом із мікроорганізмами.

Умови для росту мікроорганізмів при періодичному і безперервному процесі істотно відрізняються. При періодичному – концентрація поживних речовин у середовищі з плином часу зменшується, а вміст продуктів метаболізму збільшується, що несприятливо впливає на життєдіяльність мікроорганізмів, а при

безперервному – ці два показники підтримують на постійному рівні, що створює найсприятливіші умови для росту мікроорганізмів.

На ріст та розмноження мікроорганізмів істотно впливають склад і якість живильного середовища. Живильні середовища, які використовують для культивування мікроорганізмів, повинні містити речовини, що задовольняють їхні потреби в структурних елементах та енергії. Основні хімічні елементи, необхідні для всіх без винятку мікроорганізмів, які споживаються у відносно великих кількостях – вуглець, азот, кисень і водень. Крім того, мікроорганізми потребують фосфору, калію, сірки, натрію, магнію та інших елементів.

Роль вуглецю, азоту і фосфору в процесах мікробіологічного синтезу є першочерговою. Від інших компонентів мінерального живильного середовища ці речовини відрізняє порівняно висока швидкість їх споживання мікроорганізмами та необхідність підтримання в середовищі високих «фонових» концентрацій.

Особливістю процесів мікробіологічного синтезу є залежність стехіометричних коефіцієнтів споживання основних поживних речовин від фізіологічної активності клітин. При розрахунку цих коефіцієнтів загальні витрати поживних речовин (субстрату) можна розділити на витрати, пов'язані з процесами побудови біомаси, і на витрати, пов'язані з процесами метаболізму мікроорганізмів.

## 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ.

Витрати субстрату на приріст біомаси розраховують за формулою:

$$\frac{dS}{dt} = \alpha_1^S \frac{dX}{dt} \quad (1)$$

Витрати субстрату на основний обмін (метаболізм) визначають за формулою:

$$\frac{dS}{dt} = \alpha_2^S X \quad (2)$$

Тоді загальні витрати субстрату на процес мікробного синтезу дорівнюють сумі зазначених витрат:

$$\frac{dS}{dt} = \alpha_1^S \frac{dX}{dt} + \alpha_2^S X \quad (3)$$

де  $S$ ,  $X$  – відповідно концентрація субстрату та біомаси;  
 $\frac{dS}{dt}$ ,  $\frac{dX}{dt}$  – швидкість споживання субстрату і зростання біомаси відповідно.

Введемо значення  $\alpha_1^S = a$ ;  $\alpha_2^S = b$  і перетворимо вираз (3):

$$\frac{dS}{dt} = \left[ a \frac{dX}{dt} + bX \right];$$

поділивши обидві частини рівняння на  $\frac{dX}{dt}$ , отримуємо:

$$\frac{dS}{dX} = a + b \frac{Xdt}{dX},$$

Де  $\frac{dS}{dX} = \alpha^S$  – стехіометричний коефіцієнт перетворення субстрату на біомасу; звідки

$$\alpha^S = a + \frac{b}{\mu} \quad (4)$$

Формула 4 дає змогу розрахувати питому витрату субстрату, окремих компонентів субстрату і продуктів метаболізму в процесі біосинтезу клітинної маси.

### 3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ.

**Приклад 1.** Розрахувати питому витрату субстрату, кисню, виділення вуглекислого газу, метаболічної води і тепла в процесі безперервного вирощування дріжджів на n-парафінах за питомої швидкості росту  $\mu = 0,18 \text{ год}^{-1}$ .

Середні значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$  для розрахунку стехіометричних співвідношень  $\alpha^{O_2}$ ,  $\alpha^S$ ,  $\alpha^{CO_2}$ ,  $\alpha^{H_2O}$  при вирощуванні дріжджів на n-парафінах складає:

вуглеводні:  $a = 0,85 \text{ кг/кг}$ ;  $b = 0,038 \text{ кг/кг}\cdot\text{год}$ ;

кисень:  $a = 1,35 \text{ кг/кг}$ ;  $b = 1,35 \text{ кг/кг}\cdot\text{год}$ ;

діоксид вуглецю:  $a = 0,90 \text{ кг/кг}$ ;  $b = 0,10 \text{ кг/кг}\cdot\text{год}$ ;

метаболічна вода:  $a = 0,61 \text{ кг/кг}$ ;  $b = 0,045 \text{ кг/кг}\cdot\text{год}$ .

Використовуючи загальну залежність виду  $\alpha^S = a + \frac{b}{\mu}$ , а також співвідношення, що визначає кількість тепла, яке виділяється в процесі біосинтезу при споживанні 1 г кисню (у середньому 14,2 кДж/г), отримаємо:

Для субстрату (вуглеводнів):  $\alpha^S = 0,85 \text{ кг/кг} + \frac{0,038 \text{ кг/кг}\cdot\text{год}}{0,18 \text{ год}^{-1}} = 1,06 \text{ кг}$  субстрату на 1 кг біомаси.

Для кисню:  $\alpha^S = 1,35 \text{ кг/кг} + \frac{1,35 \text{ кг/кг}\cdot\text{год}}{0,18 \text{ год}^{-1}} = 8,85 \text{ кг}$  кисню на 1 кг біомаси.

Для діоксиду вуглецю  $\alpha^S = 0,90 \text{ кг/кг} + \frac{0,10 \text{ кг/кг}\cdot\text{год}}{0,18 \text{ год}^{-1}} = 1,46 \text{ кг}$  діоксиду вуглецю на 1 кг біомаси.

Для метаболічної води:  $\alpha^S = 0,61 \text{ кг/кг} + \frac{0,045 \text{ кг/кг-год}}{0,18 \text{ год}^{-1}} = 0,86 \text{ кг}$  метаболічної води на 1 кг біомаси.

Виділення тепла в процесі біосинтезу в перерахунку на 8,85 кг (8850 г) поглинутого кисню становитиме:

$$\alpha^Q = 14,2 \frac{\text{кДж}}{\text{г}} \cdot 8850 \text{ г} = 125670 \text{ кДж на 1 кг біомаси.}$$

**Приклад 2.** Визначити значення параметрів процесу вирощування дріжджів на вуглеводневому субстраті за таких значень коефіцієнтів моделі:  $\mu_{max} = 0,55 \text{ год}^{-1}$ ;  $K_S = 0,4 \text{ кг/кг}$ ;  $\alpha^S = 1,03 \text{ кг/кг}$ ;  $\alpha = 0,8 \text{ кг/кг}$ ;  $b = 0,035 \text{ кг/кг-год}$ ;  $S_0 = 20 \text{ кг/м}^3$ .

Використовуючи залежність виду  $\mu = \frac{\mu_{max} S}{K_S + S}$ ;  $\alpha^S = a + \frac{b}{\mu}$ ;  $\frac{dS}{dX} = \alpha^S = \frac{1}{Y}$ , після відповідних перетворень отримаємо:

$$\mu = \frac{b}{\alpha^S - \alpha} = \frac{0,035}{1,03 - 0,8} = 0,152 \text{ год}^{-1};$$

$$S = \frac{\mu K_S}{\mu_{max} - \mu} = \frac{0,152 \cdot 0,4}{0,55 - 0,152} = 0,151 \text{ кг/м}^3;$$

$$(S_0 - S) = \alpha^S X$$

$$\text{Звідси } X = \frac{S_0 - S}{\alpha^S} = \frac{20 - 0,151}{1,03} = 19,27 \text{ кг/м}^3$$

$$Y = \frac{X}{S_0 - S} = \frac{19,27}{20 - 0,151} = 0,97 \text{ або } Y = \frac{1}{\alpha^S} = \frac{1}{1,03} = 0,97$$

$$P = DX, \text{ оскільки } \mu = D, \text{ то}$$

$$P = 0,152 \cdot 19,27 = 2,929 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{год}$$

Ступінь використання субстрату знайдемо за формулою:

$$\varphi = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100\%$$

$$\varphi = \frac{20 - 0,151}{20} \cdot 100\% = 99,24\%$$

Якщо відома годинна продуктивність підприємства за готовим продуктом А (кг/год), то робочий об'єм ферментатора ( $\text{м}^3$ ) отримується із співвідношення:  $V_p = \frac{A_p}{D}$ .

#### 4. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ.

Згідно табл. 1 визначити значення параметрів процесу вирощування дріжджів на субстраті.

Таблиця 1 – Варіанти для розрахунку.

| №  | Субстрат              | $b$ ,<br>кг/кг·год | $\mu_{max}$ ,<br>год <sup>-1</sup> | $K_S$ ,<br>кг/кг | $\alpha^S$ ,<br>кг/кг | $\alpha$ ,<br>кг/кг | $S_0$ ,<br>кг/кг |
|----|-----------------------|--------------------|------------------------------------|------------------|-----------------------|---------------------|------------------|
| 1  | Для вуглеводнів       | 0,038              | 0,53                               | 0,4              | 1,03                  | 0,6                 | 24               |
| 2  | Для кисню             | 0,0135             | 0,55                               | 0,3              | 1,05                  | 0,8                 | 22               |
| 3  | Для діоксиду вуглецю  | 0,10               | 0,51                               | 0,6              | 1,07                  | 0,7                 | 20               |
| 4  | Для матаболічної води | 0,045              | 0,52                               | 0,4              | 1,02                  | 0,6                 | 18               |
| 5  | Для вуглеводнів       | 0,038              | 0,55                               | 0,3              | 1,05                  | 0,8                 | 20               |
| 6  | Для кисню             | 0,0135             | 0,54                               | 0,5              | 1,03                  | 0,6                 | 19               |
| 7  | Для діоксиду вуглецю  | 0,10               | 0,56                               | 0,6              | 1,04                  | 0,7                 | 22               |
| 8  | Для матаболічної води | 0,045              | 0,51                               | 0,4              | 1,03                  | 0,8                 | 19               |
| 9  | Для вуглеводнів       | 0,038              | 0,54                               | 0,5              | 1,06                  | 0,7                 | 21               |
| 10 | Для кисню             | 0,0135             | 0,56                               | 0,6              | 1,02                  | 0,6                 | 20               |

### Контрольні питання.

1. Якими параметрами характеризується ріст клітин мікроорганізмів?
2. Дайте характеристику основних способів культивування мікроорганізмів.
3. Як розрахувати питому витрату субстрату та його окремих компонентів у процесі вирощування клітин?

### Література

1. Векірчик К.М. Практикум з мікробіології: навч. посіб. / К. М. Векірчик. – К. : Либідь, 2001. – 144 с.
2. Сидоров Ю. І. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості / Ю. І. Сидоров, Р. Й. Влязло, В. П. Новіков. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 252 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №7

**Тема: Виробництві соняшникової олії. Відходи виробництва та їх застосування.**

**Мета заняття:** ознайомлення з основними аспектами отримання соняшникової олії та напрямками використання відходів виробництва.

## 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.

### 1.1 Технологія виробництва соняшникової олії.

Значне місце в жиросировинній підгалузі харчової промисловості України займає виробництво соняшникової олії, у якому країна є одним із світових лідерів.

Соняшник як олійна культура нагромаджує у ендоспермі певну кількість олії, що може бути видалена у процесах обробки насіння. Культура містить більше 55% олії, а оболонка - лузга складає 19-26%. Основною продукцією виробництва олії є олія та шрот.

На практиці олію з рослинної сировини отримують двома способами: віджимом (пресуванням на шнекових пресах) та розчиненням в легколетких органічних розчинниках (екстракційний спосіб). Проте такі способи можуть застосовуватись одночасно: спочатку підготовлена сировина пресується, а потім за допомогою розчинників видобувається з насіння майже вся олія.

*Першим етапом* переробки насіння у олію є його доочистка на віялках та сушіння, яке значно полегшує процеси обрушування та відвіювання. Сушіння проходить при температурі 80-100°.

*Другий етап* одержання соняшникової олії – обрушування або шеретування насіння. Його суть полягає у зніманні оболонки насіння, тобто відділенні лузги від ядра. *Третій етап* – подрібнення ядра, а *четвертий етап* передбачає нагрівання подрібненого ядра при 75-80°C (іноді до 90-95°C). При цьому природна волога, яка була в клітинах ендосперму, випаровується. Після такого прожарювання м'ятку пресують, не допускаючи її охолодження.

Попереднє вилучення олії здійснюється на шнекових пресах (форпресах), на яких отримується 60-85 % олії. Остаточне її вилучення способом пресування здійснюється на шнекових пресах глибокого зняття масла (експелерах), які мають більшу ступінь стискання сировини.

Віджим відноситься до більш екологічного способу ніж екстракційний, але вихід продукту при його застосуванні менший. Одержання олії пресуванням доцільне лише тоді, коли у вихідній сировині її міститься понад 10%. З менш багатой сировини олія добувається екстракційним способом.

Слід зазначити, що тільки у порівняно невеликих господарствах здійснюється чисто пресове отримання олії. Водночас таких об'єктів в країні досить багато.

Виробництво олії пресуванням проходить у режимі холодного та гарячого віджиму. Холодний віджим передбачає видавлювання олії з насіння на пресі при температурі, значення якої не перевищує +40°C. При гарячому віджимі подрібнене насіння (мезга) спочатку прогрівається до 100–115°C, після чого здійснюється віджим сировини на шнековому олійному пресі.

Олія з насіння соняшнику, отримана віджимом є нерафінованим продуктом, в якому зберігається більша частина вітамінів і мінералів, що містяться в сировині. У порівнянні з екстраційним способом віджим є більш корисним та містить меншу кількість домішок. Крім цього, процес механічного пресування характеризується мінімумом споживаної енергії; простим технічним обладнанням, що займає невелику площу. Макуха, що залишилася після механічного віджиму, може бути використана для подальшої екстракції з цілю вилучення залишків олії або ж за іншими цілями.

Використовується декілька методів механічного пресування, а саме: одноразове, дворазове і триразове пресування, кожне з яких має свої переваги та недоліки. Одержання соняшникової олії методом подвійного пресування включає наступні стадії: очищення насіння; шеретування; розділення рушанки; вальцювання; вологотеплова обробка; форпресування; вологотеплова обробка жмиху; експелерування; відстоювання; фільтрація та кінцева стадія – олія пресова.

Повне виділення олії, що попередньо знежирена пресуванням, забезпечується *екстракцією*, що дозволяє отримати до 99 % олії ( рис.1).

Для процесів екстракції використовуються розчинники (різні марки бензину, гексан). Процес екстракції застосовується тільки для виробництва рафінованого продукту.

Сирі олії завжди містять різноманітні домішки у формі фосфоліпідів, воску, барвників та їх продуктів (вільні жирні кислоти, дігліцирин тощо). Також товарна олія має механічні домішки, а саме: частки мезги, макухи або шроту. Ці речовини знижують якість одержаної продукції і потребують видалення. Очищення олій від супутніх речовин називається *рафінацією*.

*Рафінація* включає гідратацію та нейтралізацію, в процесі яких видаляються білкові речовини та речовини з вмістом фосфору, а також гідрофільні домішки.

*Відбілювання (адсорбційна рафінація)* є процесом обробки олії адсорбентами природного походження з цілю видалення пероксидних сполук та речовин, що містять фосфор. Для цього процесу звичайно використовується вибілювальна бентонітова глина.

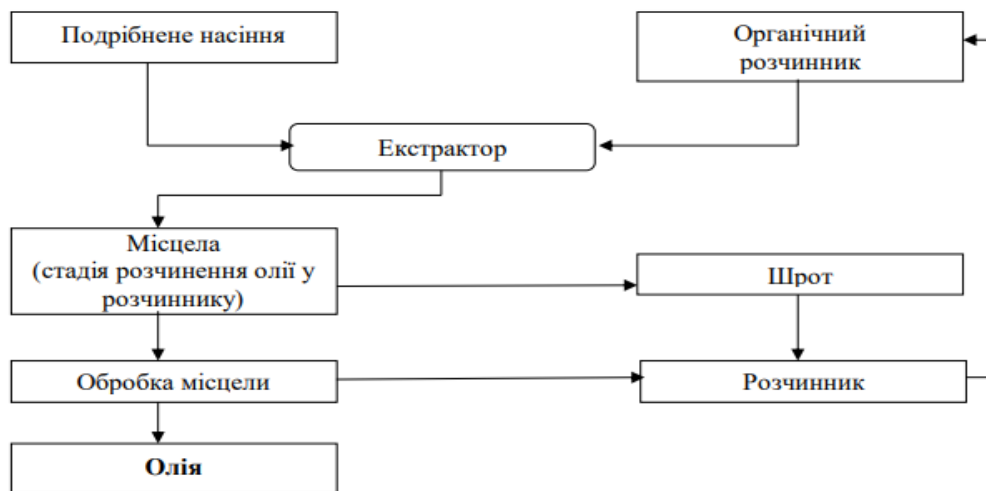


Рис. 1 – Принципова технологічна схема отримання олії екстракційним способом [2].

*Виморожування* передбачає кристалізацію воскоподібних речовин та їх видалення.

*Дезодорація* призначена для видалення одорантів (речовин, що відповідають за смак та запах олії). Процес проходить із застосуванням гарячої сухою парою під вакуумом.

## 1.2 Відходи виробництва соняшникової олії

Основними відходами при виробництві соняшникової олії є *макуха*, що утворюється при застосуванні методу пресування, *шрот* – при використанні екстракційного методу, а також лушпиння. До відходів відносять *фуз* – вторинний продукт, утворений при виготовленні нерафінованої соняшникової олії, *відпрацьовані відбільні глини*, *концентрат фосфатидний*, що з'являється в результаті гідратації олії.

*Макуха*, яка ще називається як шрот соняшниковий, містить цинк, фосфор, калій та ін. Також у складі макухи є рослинний білок і олія, яка залишається в шроті після пресування насіння. Макуха знаходить своє використання у виробництві комбікормів, як додаток до грубого корму та добрив для ґрунту. Крім того, макуха може використовуватись як паливо, що має незначний рівень вологості, підвищенні показники теплотворення і низькі показники зольності.

*Шрот* (або шріт) є твердим залишком насіння після вилучення з нього олії екстракційним способом. По суті він – побічний продукт виробництва, який отриманий після екстрагування олій розчинниками.

Шрот вважається високобілковим концентрованим кормом для сільськогосподарських тварин і може використовуватись як самостійний корм, так і входити до складу комбікормів. У порівнянні з зерновими

злаками, шрот, як і макуха, мають більший вміст лізину, метіоніну, цистину, триптофану, кальцію та фосфору, вітамінів групи В. Шрот вміщує метіонін, ніацин, рибофлавін, холін, біотин, пантотенову кислоту, піридоксин, вітамін Е та характеризується високим попитом.

*Соняшникове лушпиння* у своєму складі містить мінеральні речовини, целюлозу, воно багате пентозинами і в подрібненому вигляді використовується як добавка до грубих кормів. При промисловій переробці насіння соняшника лушпиння становить 17-20% до його маси. Шляхами використання лушпиння є спалювання; виробництво гранул/брикетів; вивіз на звалища. Також лушпиння застосовується у якості кормової добавки в тваринництві і птахівництві, в будівництві; при вирощуванні грибів, як добриво для ґрунту та ін.

*Соняшниковий фуз* використовують на комбикормових заводах та хімічних підприємствах (виробництво оліфи).

## **2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.**

1. Визначити та охарактеризувати шляхи використання відходів, що утворюються при одержанні олії методами віджиму та екстракції.

2. Використовуючи літературні джерела, привести інформацію з нових напрямків корисного використання відходів виробництва соняшникової олії.

3. Розглянути питання щодо випадків віднесення лушпиння соняшнику до категорії «вторинна сировина» та «відходи».

### ***Контрольні питання.***

1. Способи отримання соняшникової олії та їх особливості.
2. Переробка насіння соняшнику в олію методом механічного пресування.
3. Суть екстраційного способу отримання олії.
4. Поняття рафінації та її призначення.
5. Відходи виробництва соняшникової олії та їх використання як вторинної сировини.

### **Список літератури**

1. Закон України «Про управління відходами». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
2. Гніцевич В. А., Никифоров Р. П., Слащева А. В. Харчові технології. Технологія продуктів рослинного походження : навч. посібник. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2021. – 267с.
3. Технологія основних виробництв: навч. посібник для студентів денної та заочної форм навчання / В.М. Кропівний, А.В. Кропівна, Л.А. Молокост, М.В.Босий, О.В. Кузик.– Кропивницький : Видавництво ТОВ «КОД», 2021. – 196 с.

4. Сухенко Ю.Г., Серьогін О.О., Сухенко В.Ю., Рябоконт Н.В. Ресурсозберігаючі технології в харчових і переробних виробництвах: підручник / За ред. проф. О.О.Серьогіна. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. – 338 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 8

**Тема: Розрахунок обсягів забруднюючих речовин, утворених у гальванічному виробництві.**

**Мета заняття:** ознайомлення з основними аспектами технології нанесення гальванічних покриттів на машинобудівних заводах та проведення розрахунків обсягів викидів, що утворюються у цьому процесі.

### 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.

Значна частина вироблених на машинобудівних заводах деталей та заготовок потребує технологічний операцій щодо захисту їх поверхонь від корозійних процесів та у багатьох випадках поліпшення зовнішнього виду. З цією цілю на машинобудівних заводах має місце гальванічне виробництво (гальванічні цеха чи дільниці), робота яких передбачає нанесення на поверхні деталей металопокриття.

Процес нанесення гальванічного покриття включає наступні етапи: механічна підготовка поверхні; хімічна і/або електрохімічна підготовка поверхні у розчинах; хімічне і/або електрохімічне нанесення покриттів. Кожна виробнича операція, яка характеризує етап, є джерелом утворення різних за видом та обсягом забруднюючих речовин, що надходять у викиди підприємства.

#### 1.1 Механічна підготовка поверхні виробів.

Механічна підготовка поверхні виробів – це початковий етап процесу нанесення гальванічного покриття, який забезпечує очищення та створення необхідної шорсткості для покращення адгезії покриття. В процесі механічної підготовки поверхні усуваються дефекти, такі як задирки, окалина, раковини, шлакові залишки та неметалеві включення.

Механічна обробка поверхні здійснюється різними методами, зокрема:

- **очищенням сипкими абразивними матеріалами** (чавунний або сталевий дріб, наждаковий пісок), що забезпечує видалення забруднень та окалини;
- **галтівкою** – обробкою деталей у барабанах шляхом їх повільного перекочування разом з абразивним матеріалом;
- **вібраційною галтівкою** – удосконаленою версією галтівки, де механічна дія підсилюється вібрацією;

– **шліфуванням та поліруванням**, що дозволяє досягти високої чистоти та гладкості оброблюваної поверхні.

Внаслідок механічної підготовки утворюється пил, металева стружка, тверді частинки абразивів, які можуть потрапляти у виробничі викиди та потребують відповідного очищення.

Кількість пилу, що виділяється при проведенні механічної обробки поверхні виробів, представлена в табл. 1. Витрати повітря, що проходить через камеру обладнання для механічної підготовки поверхні виробів, становлять 300-350 м<sup>3</sup> /год із розрахунку на 1 м<sup>3</sup> внутрішнього об'єму камери. Для шліфувальних та полірувальних верстатів витрати повітря, що аспірується, залежать від діаметрів шліфувальних та полірувальних кругів і в середньому становлять 2 м<sup>3</sup> /год на 1 мм діаметру круга

Таблиця 1 – Характеристика викидів пилу від технологічного обладнання, що застосовується при механічній підготовці поверхні виробів

| Технологічне обладнання                   | Характер пилу                                | Концентрація пилу, мг/м <sup>3</sup> |
|---|--|--------------------------------------|
| Барабани лушпильні галтовочні             | Механічна окалина, піщаний пил               | 0,5-0,8                              |
| Гідроабразивні установки                  | Мінімальна кількість суспендованих частинок  | 0,2-0,5                              |
| Камери лушпильні дробометні               | Абразивний пил, металевий пил                | 2,0-5,0                              |
| Шліфувальні верстати з аспірацією         | Абразивний металевий пил                     | 0,1-0,4                              |
| Закриті полірувальні верстати             | Текстильний пил, пил від полірувальної пасти | 0,05-0,2                             |
| Ультразвукові установки для очищення      | Відсутність сухого пилу, осадкові частинки   | <0,1                                 |
| Лазерні установки для поверхневої обробки | Мінімальна кількість аерозолів               | <0,05                                |

### **1.2 Підготовка поверхні деталей у розчинах**

Процес хімічної та електрохімічної підготовки поверхні виробів у розчинах включає *знежирення* та *травлення*, спрямовані на видалення органічних і неорганічних забруднень. До таких забруднень належать жирові відкладення, мастильні матеріали, окалина, продукти корозії, оксидні плівки тощо.

Знежирення здійснюється шляхом занурення деталей у ванни з:

– органічними розчинниками: бензин, гас, уайт-спирит, трихлоретилен, перхлоретилен;

– водними лужними мийними розчинами, що містять кальціоновану соду, їдкий натр, тринатрійфосфат, а також поверхнево-активні речовини (ПАР).

Електрохімічне знежирення застосовують для інтенсифікації процесу, використовуючи лужні розчини. У цьому випадку масляні забруднення утворюють емульсію, а жирова плівка видаляється під дією бульбашок водню ( $H_2$ ) та кисню ( $O_2$ ), що утворюються на електродах. Внаслідок цього процесу в повітря можуть виділятися пари органічних розчинників і тумани лугів.

Хімічне та електрохімічне травлення застосовують для усунення оксидної плівки, яка може бути невидимою, але значно впливає на адгезію покриття.

Основні реагенти для травлення:

– кислоти: сульфатна ( $H_2SO_4$ ), хлоридна ( $HCl$ ), нітратна ( $HNO_3$ ), фторидна ( $HF$ );

– лужні розчини та розплави солей.

Для прискорення процесу використовують електрохімічне травлення, що здійснюється у тих самих середовищах. При цьому у повітря можуть виділятися аерозолі кислот і лугів, токсичні гази ( $HCN$ ,  $HF$ ,  $NO_x$ ) та іони важких металів.

Величини питомих викидів забруднюючих речовин, що виділяються в атмосферне повітря від різних технологічних процесів обробки поверхні виробів у розчинах, наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Питомі викиди забруднюючих речовин при основних технологічних процесах обробки поверхні виробів обезжирюванням та травленням

| № п/п                       | Технологічний процес     | Забруднюючі речовини | Питомий викид забруднюючої речовини з поверхні дзеркала ванни, г/(м <sup>2</sup> ·год) |
|-----------------------------|--------------------------|----------------------|--|
| Знежирення поверхні виробів |                          |                      |  |
| 1                           | В органічних розчинниках | Бензин               | 4530   |
| 2                           |                          | Гас                  | 1560   |
| 3                           |                          | Уайт-спірит          | 5800   |
| 4                           |                          | Бензол               | 2970   |
| 5                           |                          | Трихлоретилен        | 3940   |
| 6                           |                          | Тетрахлоретилен      | 4200   |
| 7                           |                          | Тетрафторетилен      | 14910  |
| 8                           | Хімічне, в розчинах лугу | Їдкий луг            | 1,0  |
| 9                           | Електрохімічне           |                      | 39,6   |

Продовження табл. 2.

| Хімічне травлення поверхні виробів  |  |                                |       |
|---|--|--------------------------------|-------|
| 1   | У розчині хромової кислоти та її солей | Хромовий ангідрид              | 0,02  |
| 2   | У розчині лугу                         | Їдкий луг                      | 198,0 |
| 3   | У розчинах сірчаної кислоти            | Сірчана кислота                | 25,2  |
| У розчинах соляної кислоти з різною концентрацією, г/дм <sup>3</sup>                |  |                                |       |
| 4   | До 200                                 | Хлористий водень               | 1,1   |
| 5   | 200-250                                |                                | 3,0   |
| 6   | 250-300                                |                                | 10,0  |
| 7   | 300-350                                |                                | 20,0  |
| 8   | 350-500                                |                                | 50,0  |
| 9   | 500-1000                               |                                | 288,0 |
| У розчинах фтористоводневої кислоти та її солей, з концентрацією, г/дм <sup>3</sup> |  |                                |       |
| 11  | До 10                                  | Фтористий водень               | 1,0   |
| 12  | 10-20                                  |                                | 5,0   |
| 13  | 20-50                                  |                                | 10,0  |
| 14  | 50-100                                 |                                | 18,0  |
| 15  | 100-150                                |                                | 36,0  |
| 16  | 150-200                                |                                | 42,0  |
| 17  | > 200                                  |                                | 72,0  |
| 18  | У розчинах ортофосфорної кислоти       | Фосфорна кислота               | 2,2   |
| 19  | У розведених розчинах азотної кислоти  | Азотна кислота та оксиди азоту | 10,8  |

### 1.3 Хімічне та електрохімічне нанесення покриття

Залежно від типу покриття, що наноситься, розрізняють такі гальванічні процеси:

**Цинкування** – електролітичне осадження атомів цинку на поверхні виробу для захисту сплавів заліза від атмосферної корозії. Як електроліт використовують солі цинку: сульфатний ( $ZnSO_4$ ), тетрафтороборатний ( $Zn(BF_4)_2$ ), ціанисті сполуки ( $ZnO + NaCN$ ,  $Na_2Zn(CN)_4$ ).

**Кадміювання** – метод гальванічного покриття, що забезпечує високу корозійну стійкість сталей, особливо в умовах морської води та агресивних атмосферних середовищ. Використовуються електроліти: сульфат кадмію ( $CdSO_4$ ), тетрафтороборат кадмію ( $Cd(BF_4)_2$ ).

**Лудіння** – нанесення шару олова для захисту від окислення та поліпшення паяних з'єднань.

**Оксидування** (анодування) – утворення оксидної плівки для захисту алюмінію та його сплавів.

**Фосфатування** – створення антикорозійного покриття шляхом осадження фосфатних сполук металів.

**Свинцювання** – нанесення шару свинцю для захисту від корозії та кислотного впливу.

**Міднення** – використовується як проміжне покриття перед нікелюванням або хромуванням для покращення адгезії.

**Нікелювання** – створення декоративного та антикорозійного покриття з нікелю.

**Хромування** – нанесення шару хрому для захисту від зношування, підвищення твердості та стійкості до корозії.

**Сріблення** – покриття сріблом для електропровідності та захисту від окислення.

**Золотіння** – нанесення золота для декоративних, антикорозійних та електротехнічних цілей.

Процеси виконуються зануренням деталей у ванни з електролітами (розчинами кислот, лугів, солей або їх сумішей) і пропусканням електричного струму. Це забезпечує формування захисних покриттів шляхом електролітичного осадження. У процесі можуть виділятися аерозолі кислот і лугів, пари фтороводню (HF) та синильної кислоти (HCN), краплі розчинів з іонами важких металів, а також водень (H<sub>2</sub>).

Величини питомих викидів забруднюючих речовин, що виділяються в атмосферне повітря від різних технологічних процесів нанесення покриття, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Питомі викиди забруднюючих речовин при нанесенні покриття на поверхні виробів

| № п/п                                    | Технологічний процес  | Забруднюючі речовини           | Питомий викид забруднюючої речовини з поверхні дзеркала ванни, г/(м <sup>2</sup> ·год) |
|--|---|--------------------------------|--|
| <b>Електрохімічне нанесення покриття</b> |   |                                |  |
| 1  | У розчині хромової кислоти концентрацією 150-300 г/дм <sup>3</sup> при силі струму 1000 А | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 36   |
| 2  | У розчині хромової кислоти концентрацією 20-100 г/дм <sup>3</sup> при силі струму 500 А   |                                | 3,3  |
| 3  | У розчині лугу  | луг                            | 39,6   |
| 4  | У розчинах фтористоводневої кислоти та її солей, концентрацією до 10 г/дм <sup>3</sup>    | HF                             | 1,04   |
| 5  | – " – 10-25 г/дм <sup>3</sup>   |                                | 10,08  |
| 6  | – " – 25-100 г/дм <sup>3</sup>  |                                | 36,0   |

Продовження табл. 3.

|                                   |  |                                   |       |
|-----------------------------------|--|-----------------------------------|-------|
| 7                                 | – " – 100-200 г/дм <sup>3</sup>  |                                   | 50,04 |
| 8                                 | – " – > 200 г/дм <sup>3</sup>  |                                   | 72,0  |
| 9                                 | у розчинах сірчаної кислоти<br>концентрацією 150-350 г/дм <sup>3</sup> | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 25,08 |
| 10                                | – " – 45-52 г/дм <sup>3</sup>  | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 0,68  |
| <b>Хімічне нанесення покриття</b> |  |                                   |       |
| 1                                 | Цинкування кисле   | ZnSO <sub>4</sub>                 | 10,44 |
| 2                                 | – хлористоамонійне   | NH <sub>3</sub>                   | 6,34  |
| 3                                 | – лужне  | NaOH                              | 39,6  |
| 4                                 | – хлористе   | KCl                               | 2,38  |
| 5                                 | Кадмування в ціаністих<br>розчинах                                     | HCN                               | 19,8  |
| 6                                 | Цинкування у ціаністих<br>розчинах                                     |                                   | 5,4   |
| 7                                 | Золотування у ціаністих<br>розчинах                                    |                                   | 1,98  |
| 8                                 | У розчинах лугу (оксидування)  | Луг                               | 198,0 |
| 9                                 | Мідноборофтористе  | HF                                | 10,01 |
| 10                                | Амальгування   | Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 0,11  |

## 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОБСЯГІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН.

Розрахунок величини викиду забруднюючої речовини (т/рік), яка виділяється при обробці поверхні виробів у розчинах або при нанесенні покриття, визначається за формулою:

$$П_0 = 10^{-6} \cdot T \cdot q \cdot F \cdot k_3 \cdot k_y, \quad (1)$$

де  $q$  – питома кількість речовини, що утворюється з одиниці поверхні ванни при номінальному навантаженні (г/(м<sup>2</sup> · год)); Знаходиться за даними табл. 2 та 3;  $T$  – час роботи устаткування, год.;  $F$  – площа дзеркала ванни, м<sup>2</sup>;  $k_y$  – коефіцієнт укриття ванни: при наявності у складі розчину поверхнево-активних речовин (ПАР)  $k_y = 0,5$ ; при відсутності ПАР  $k_y = 1$ ;  $k_3$  – коефіцієнт завантаження ванни.

Кількість парів органічних розчинників, що виділяються при обезжирюванні поверхні виробів, розраховується за формулою:

$$П = 10^{-6} \cdot T \cdot q \cdot F \cdot m, \quad (2)$$

де  $m$  – коефіцієнт, що залежить від площі випаровування (табл.4).

Таблиця 4 – Визначення коефіцієнту  $m$

|                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| F,<br>м <sup>2</sup> | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 0,80 | 0,85 | 0,90 | 0,95 | ≥1,0 |
| m                    | 1,45 | 2,87 | 2,35 | 2,56 | 2,17 | 2,00 | 1,85 | 1,72 | 1,60 | 1,52 | 1,00 |

### 3. ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Ознайомитися з теоретичними основами визначення кількісних та якісних характеристик емісії забруднюючих речовин від гальванічного виробництва.

2. Розрахувати годинні об'єми повітря, яке аспірується, та кількість пилю, що виділяється при роботі обладнання для механічної підготовки поверхні виробів.

Вихідні дані для розрахунку представлені у табл. 5. Для виконання розрахунку слід користуватися табл. 1.

3. Визначити кількість забруднюючих речовин, що виділяються при проведенні обробки поверхні деталей у розчинах (за 1 год). Вихідні дані для виконання завдання наведені в табл. 6. Для виконання розрахунку слід користуватися табл. 2 та формулами (1) та (2).

Таблиця 5 – Вихідні дані для розрахунку (механічна підготовка поверхні виробів)

| № варіанту | Об'єм камери обладнання, м <sup>3</sup><br>(табл. 1) | Діаметр шліфувального круга, мм | Діаметр полірувального круга, мм |
|------------|--|---------------------------------|----------------------------------|
| 1          | 1-45   | 40                              | 250                              |
| 2          | 2-50   | 45                              | 260                              |
| 3          | 3-55   | 50                              | 270                              |
| 4          | 1-60   | 55                              | 280                              |
| 5          | 2-70   | 60                              | 290                              |
| 6          | 3-80   | 65                              | 300                              |
| 7          | 1-20   | 70                              | 310                              |
| 8          | 2-25   | 75                              | 320                              |
| 9          | 3-30   | 80                              | 330                              |
| 10         | 1-35   | 85                              | 340                              |

Таблиця 6 – Вихідні дані для розрахунку (підготовка поверхні виробів у розчинах)

| Вар. | Завантаження ванни, % | Технологічний процес |                                      |                  |                                      |
|------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|
|      |                       | знежирення           |                                      | травлення        |                                      |
|      |                       | розчин (табл. 2)     | площа дзеркала ванни, м <sup>2</sup> | розчин (табл. 2) | площа дзеркала ванни, м <sup>2</sup> |
| 1    | 100                   | 1                    | 0,60                                 | 1                | 0,95                                 |
| 2    | 98                    | 2                    | 0,65                                 | 2                | 1,00                                 |
| 3    | 99                    | 3                    | 0,70                                 | 3                | 1,05                                 |
| 4    | 95                    | 5                    | 0,75                                 | 4                | 1,10                                 |
| 5    | 90                    | 5                    | 0,80                                 | 5                | 1,15                                 |
| 6    | 92                    | 6                    | 0,85                                 | 6                | 1,20                                 |
| 7    | 94                    | 7                    | 0,90                                 | 7                | 1,15                                 |
| 8    | 96                    | 8                    | 1,95                                 | 8                | 1,30                                 |
| 9    | 93                    | 9                    | 1,00                                 | 9                | 0,85                                 |
| 10   | 100                   | 1                    | 1,05                                 | 10               | 0,90                                 |

4. Визначити кількість забруднюючих речовин, що виділяються при нанесенні покриття на поверхню деталей ( за 1 год). Вихідні дані для виконання завдання наведені в табл. 7. Для виконання розрахунку слід користуватися табл. 3 та формулою (1).

Таблиця 7 – Вихідні дані для розрахунку (нанесення покриття на поверхню виробів)

| № варіанту | Завантаження ванни, % | Технологічний процес |                                      |                  |                                      |
|------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|
|            |                       | електрохімічне       |                                      | хімічне          |                                      |
|            |                       | розчин (табл.3)      | площа дзеркала ванни, м <sup>2</sup> | розчин (табл. 3) | площа дзеркала ванни, м <sup>2</sup> |
| 1          | 90                    | 1                    | 1,55                                 | 2                | 1,70                                 |
| 2          | 91                    | 2                    | 1,60                                 | 4                | 1,75                                 |
| 3          | 98                    | 3                    | 1,65                                 | 6                | 1,80                                 |
| 4          | 99                    | 4                    | 2,00                                 | 8                | 1,85                                 |
| 5          | 96                    | 5                    | 2,05                                 | 10               | 1,90                                 |
| 6          | 95                    | 6                    | 2,10                                 | 1                | 1,95                                 |
| 7          | 94                    | 7                    | 2,30                                 | 3                | 2,00                                 |
| 8          | 92                    | 8                    | 2,35                                 | 5                | 2,05                                 |
| 9          | 100                   | 9                    | 2,40                                 | 7                | 2,10                                 |
| 10         | 95                    | 10                   | 2,45                                 | 9                | 1,60                                 |

### Список літератури

1. Яковенко І. Е., Пермяков О. А., Фесенко А. В. Технологічні основи машинобудування: навч. посібник для студентів спеціальностей 131 – Прикладна механіка, 133 –Галузеве машинобудування / І. Е. Яковенко, О. А. Пермяков, А.В. Фесенко – Харків: НТУ «ХП», 2022. – 421с.

2. Технологія основних виробництв:навч. посібник для студентів денної та заочної форм навчання / В.М. Кропівний, А.В. Кропівна, Л.А. Молокост, М.В.Босий, О.В. Кузик.– Кропивницький : Видавництво ТОВ «КОД», 2021. – 196 с.

3. Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»; 133 «Галузеве машинобудування» / Ю.М. Малафєєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Електронні текстові дані (1 файл: Мбайт). - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 201 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/da80859a-3816-4847-910f-1e0d5289c11c/content>

4. Якименко Г.Я. Гальванічні покриття. Аспекти вибору, функціональні властивості і технологія одержання : навч. посібник /Г.Я. Якименко, В.М. Артеменко. Харків: НТУ «ХП», 2009.–148 с.

5. Основи електрохімії : навч. посіб. / О. В. Кислова, І. С. Макеєва. – К. : КНУТД, 2017. – 128 с.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Вступ.....   | 3  |
| Практичне заняття №1. Виплавка сталі киснево-конверторним способом: конструкційні особливості апаратів та екологічні аспекти .....         | 3  |
| Практичне заняття №2. Викиди забруднюючих речовин, утворені у металургійному виробництві. Вибір та обґрунтування системи їх очищення ..... | 12 |
| Практичне заняття №3. Розрахунок викидів забруднюючих речовин, утворених при спалюванні твердого палива у котлоагрегатах .....             | 17 |
| Практичне заняття №4. Технологічні процеси виробництва нітратної кислоти. Очищення «хвостових» газів .....                                 | 22 |
| Практичне заняття №5. Технологічні та екологічні аспекти виробництва сульфатної кислоти .....  | 29 |
| Практичне заняття №6. Способи культивування мікроорганізмів...   | 36 |
| Практичне заняття №7. Виробництві соняшникової олії. Відходи виробництва та їх застосування .....  | 41 |
| Практичне заняття №8. Розрахунок обсягів забруднюючих речовин, утворених у гальванічному виробництві .....                                 | 46 |

Навчальне видання

Методичні вказівки  
до практичних занять з дисципліни  
«Системи технологій та інженерна екологія»  
для студентів спеціальності G2 «Технології захисту навколишнього  
середовища» усіх форм навчання

Укладачі:

САМОЙЛЕНКО Наталія Миколаївна  
ШЕСТОПАЛОВ Олексій Валерійович  
БОСЮК Альона Сергіївна  
ТУЛЬСЬКА Альона Геннадіївна

Відповідальний за випуск Шестопалов О.В.  
Роботу рекомендував до друку Нечипоренко Д.І.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 292

Підп. до друку Гарнітура Times New Roman

Видавничий центр НТУ «ХПІ»,  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія