

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

О. І. Янушевська, В. І. Супрунчук

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ В ГАЛУЗІ
ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВИКИДНИХ ГАЗІВ ВІД NO_x**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра,
за освітньою програмою «Хімічні технології неорганічних речовин та
водоочищення» спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент: *Воробйова В. І.*, к.т.н., доцент, доцент, кафедра фізичної хімії, ХТФ
Відповідальний редактор: *Концевой А. Л.*, к.т.н., доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 1 від 16.09.2021 р.)
за поданням Вченої ради хіміко-технологічного факультету (протокол № 7 від 30.06.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Янушевська Олена Іванівна, канд. техн. наук, доцент
Супрунчук Володимир Ілліч, канд. хім. наук, доцент

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ГАЛУЗІ.

ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВИКИДНИХ ГАЗІВ ВІД NO_x

Екологічна безпека технологічних процесів в галузі. Основи технології очищення викидних газів від NO_x [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / О. І. Янушевська, В. І. Супрунчук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,08 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 73 с.

Анотація

Матеріал, викладений в електронному навчальному виданні, являє собою теоретичні основи методів знешкодження оксидів нітрогену, які застосовуються у промисловості, основні типи хімічного обладнання, які найчастіше використовуються в технологічно-інженерних рішеннях щодо впровадження знешкодження шкідливих викидів NO_x. типові Наведено розрахунки екологічних параметрів для оцінювання безпеки виробництва: індексу забруднення атмосфери, наднормативних викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря та розмірів відшкодування збитків за наднормативні викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря викладено в формі, доступній для сприйняття студентами.

Посібник сприяє покращенню засвоєння матеріалу із дисциплін технологічного спрямування, допомагає у підготовці реферату з дисципліни «Екологічна безпека технологічних процесів у галузі», у виконанні бакалаврського диплому та підвищення якості підготовки студентів бакалаврського рівня.

© О. І. Янушевська, В. І. Супрунчук, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

Зміст.....	3
Вступ.....	5
1 Методи очищення атмосфери від оксидів нітрогену.....	7
1.1 «Сухі» методи очищення від NO_x	7
1.1.1 Селективне каталітичне відновлювання (СКВ)	7
1.1.2 Селективне високотемпературне некаталітичне відновлення.....	11
1.1.3 Адсорбційні методи.....	13
1.2 «Мокрі» методи очищення від NO_x	15
1.2.1. Нерегенеративні методи очищення	16
1.2.1.1. Окиснювально-абсорбційні методи	16
1.2.1.2 Абсорбційно-окиснювальні методи.....	17
1.2.1.3 Абсорбція лугами та солями	18
1.2.1.4 Абсорбційно-відновлювальні методи очищення (окиснювально- абсорбційно-відновлювальні)	19
2 Розрахунки обов'язкових параметрів викидів забруднюючих речовин в атмосферу для оцінювання екологічності виробництва	27
2.1 Індекс забруднення атмосфери (ІЗА).....	27
2.2 Розрахунок наднормативних викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря	29
2.3 Розрахунок розмірів відшкодування збитків за наднормативні викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря	30
3 Нормування вмісту поллютантів.....	36
4 Розрахунки масового, молярного та об'ємного складу сумішей.....	40
4.1 Розрахунок масового і молярного складу сумішей.....	40
4.2 Розрахунок об'ємної концентрації компонентів газової суміші.....	42

Список використаної та рекомендованої літератури	47
Додаток А.....	48

ВСТУП

Оксиди нітрогену можуть існувати у вигляді сполук з різним ступенем окиснення Нітрогену: N_2O , NO , NO_2 , (N_2O_4) , N_2O_3 , N_2O_5 , в залежності від чого і відрізняються їх властивості. Наприклад, нітроген(IV) оксид є активною сполукою, яка вступає в реакцію з багатьма неорганічними та органічними речовинами.

За наявності окисників (кисню або озону) і невисоких температур відбувається окиснення оксидів Нітрогену: $NO \rightarrow NO_2 \rightarrow N_2O_4 \rightarrow N_2O_5$. Нітроген(IV) оксид легко полімеризується з утворенням димеру – N_2O_4 , ступінь полімеризації залежить від температури і за температури понад 21,15 °C димер N_2O_4 починає розпадатися на молекули NO_2 . За температури 140 °C реакція розпаду зміщується у бік утворення газоподібного NO_2 .

Оксиди Нітрогену є небезпечними, для людини, тварин та довкілля токсикантами 2, 3, 4 класу небезпеки (окрім N_2O), що в першу чергу вражають дихальні шляхи та легені, здатні викликати подразнення слизових оболонок, змінити склад крові, знизити концентрацію гемоглобіну в крові та мають наркотичні властивості.

Потужними джерелами викидів в атмосферу оксидів Нітрогену є теплоенергетичні, металургійні підприємства, автомобільний транспорт, виробництво нітратної кислоти тощо.

Інженерні методи очищення від NO_x поділяються на так звані «сухі» та «мокрі» методи.

«Сухі» способи призначені для селективного очищення газових викидів від оксидів Нітрогену з утворенням молекулярного азоту. Більшість таких методів засновані на реакціях гетерогенного каталітичного або термічного розкладу або відновлення аміаком.

«Мокрі» методи поділяють на процеси, що передбачають регенерацію абсорбенту (абсорбент циркулює по колу) та без регенерації абсорбенту (абсорбент використовується одноразово). Рідкофазні способи дозволяють очищувати одночасно від NO_x та SO_2 , який є супутнім газом.

Отже, до «сухих» способів очищення газових викидів від NO_x відносять селективне каталітичне відновлення (СКВ) аміаком та іншими відновлювальними агентами, селективне високотемпературне некаталітичне відновлення (СНКВ), адсорбція.

До «мокрих» методів належать окиснювально-абсорбційний, абсорбційно-окиснювальний, абсорбційно-відновлювальний (окиснювально-абсорбційно-відновлювальні) способи.

Навчальний посібник відноситься до навчального матеріалу дисципліни «Екологічна безпека технологічних процесів в галузі», яка займає важливе місце у підготовці сучасних фахівців з технології неорганічних речовин. Вивчення дисципліни формує екологічний підхід до створення технологій, збагачує систему базових хіміко-технологічних компетенцій, спрямовує майбутніх фахівців до створення екологічно безпечних умов виробництва неорганічних речовин та водопідготовки.

Навчальний матеріал дисципліни базується на знаннях фізичної хімії та загальної хімічної технології. Виконання розрахункових завдань з практикуму сприятиме засвоєнню та поглибленому вивченню даної дисципліни, метою якого є ознайомлення з основними технологіями очищення, утилізації і знешкодження небезпечних викидів та з розрахунками основних параметрів екологічного контролю виробництва.

1 МЕТОДИ ОЧИЩЕННЯ АТМОСФЕРИ ВІД ОКСИДІВ НІТРОГЕНУ

1.1 «Сухі» методи очищення від NO_x

1.1.1 Селективне каталітичне відновлювання (СКВ)

Денітрифікація газів каталітичним способом є широкоживаною. У основу процесу покладено відновлення оксидів Нітрогену відновлювальними агентами: NH₃, CO, CH₄, вуглеводнями, H₂, коксовим газом (суміш H₂, CH₄, CO та CO₂), коксом. Каталізатори процесу готують на основі металів платинової підгрупи, металів та оксидів металів змінної валентності тощо. Найчастіше це – Pd, Ru, Pt, Rh, V, Fe, W, Cu, Mo, Mn, Ce, Co, Ni, Sn, Zn, Zr, MnO₂, V₂O₅, CuO, Fe₂O₃, Cr₂O₃, Co₂O₃, NiO, WO₃, Ag₂O, ZrO₂, Bi₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, PbO [1].

Найбільша каталітична активність в процесі відновлення оксидів Нітрогену притаманна групі каталізаторів на основі Платини, Родію та Паладію (як носій використовують – Al₂O₃), де масовий вміст металів складає у середньому від 0,1% до 2%.

Зокрема, активно використовується паладієвий каталізатор (2%Pd/Al₂O₃) у процесі відновлення оксидів Нітрогену метаном та карбон(II) оксидом з температурою запалювання від 390 °C до 480 °C.

Метод потребує великого надлишку CH₄, частина якого реагує з киснем з утворенням CO₂. Або потрібна процедура попереднього випалювання кисню природним газом. Використовують також високотемпературні оксид-манган-паладієві контакти за температури від 370 °C до 400 °C (реакції 1.1, 1.2):



Цікавим є метод відновлення з використанням як відновника карбон(II) оксиду з точки зору одночасного знешкодження двох токсичних речовин (спалювання органічних видів палива, вихлопні газы двигунів внутрішнього згоряння). Каталізаторами цього процесу можуть бути купрум-хромові шпинелі, активне вугілля. Температура процесу коливається від 150 °C до 200 °C (реакції 1.3, 1.4).



Каталітичні методи успішно застосовують для комплексного очищення вихлопних газів автомобілів, де необхідно доокиснювати продукти неповного згоряння (CO) і відновлювати оксиди Нітрогену. Послідовно розташовують відновлювальний (мідно-нікелевий каталізатор: $\omega(\text{Ni}) = 70\%$ та $\omega(\text{Cu}) = 30\%$; глинозем або $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, що модифікований платиною) і окиснювальний каталізатор (платиновий, мідний, хромовий, нікелієвий). Відновлення описується схемою (реакції 1.5, 1.6):



Окиснення перебігає за схемою (реакції 1.7, 1.8):



На відміну від доволі токсичного карбон(II) оксиду – водень не потребує особливих умов безпеки, процес перебігає за температури від 150 °C до 200 °C на Pd-вмісних каталізаторах (реакції 1.9, 1.10):



Відновлення аміаком є селективним і не залежить від наявності кисню у газової суміші на відміну від решти відновників (реакції 1.11 – 1.15):





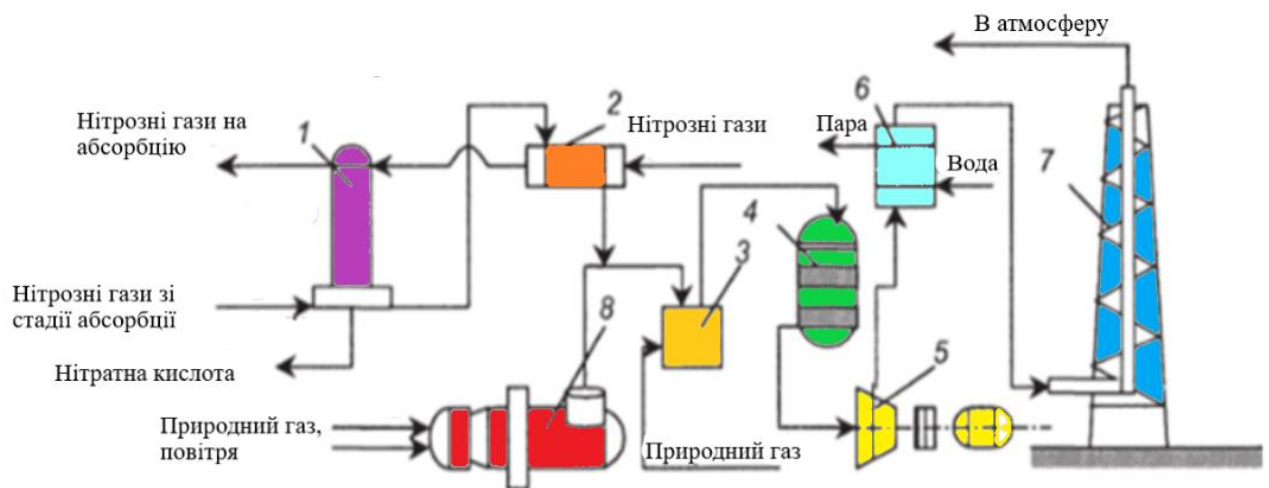
Селективне каталітичне відновлювання (СКВ) використовується для очищення від NO_x у присутності кисню та сульфур(IV) оксиду в реакційному середовищі. Як згадано вище, відновником виступає аміак. Кількість відновника коригується концентрацією оксидів Нітрогену, для очищення гарячих димових газів аміак вводять з надлишком по відношенню до вмісту NO_x задля одночасного зв'язування сульфур(IV) оксиду в амоній сульфат або амоній сульфід. Температура цих процесів знаходиться у діапазоні від 200 °С до 400 °С. Так, максимальна конверсія NO на каталізаторі $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ спостерігається за температури 300 °С, а на каталізаторі $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ за температури 400 °С.

Температура активації каталізаторів залежить від природи газу-відновника і складає від 370 °С до 480 °С для метану; 350 °С для пропану і бутану; від 150 °С до 200 °С для водню та карбон(II) оксиду; від 200 °С до 400 °С для аміаку. Тиск високотемпературного каталітичного відновлення нітрозних газів з використанням метану складає 0,73 МПа.

Селективне відновлення NO_x карбон(II) оксидом здійснюється у присутності каталізаторів на основі Ir, Pt, Pd, Rd, нанесених на Al_2O_3 .

Як каталізатори селективного відновлення оксидів Нітрогену активно досліджують системи на основі оксидів Ванадію, Цинку, Феруму, Купруму, Мангану, Ніколю, Молібдену, каталітична активність яких за температури від 200 °С до 350 °С знижується в ряду: $\text{Pt} > \text{MnO}_2 > \text{V}_2\text{O}_5 > \text{CuO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{Co}_2\text{O}_3 > \text{MoO}_3 > \text{NiO} > \text{WO}_3 > \text{Ag}_2\text{O} > \text{ZnO} > \text{Bi}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2 > \text{PbO}$.

Схема промислової установки каталітичного очищення відхідних нітрозних газів виробництв нітратної кислоти з використанням тиску – 0,73 МПа наведено на рисунку 1.



1 – підігрівач-сепаратор; 2 – теплообмінник; 3 – змішувач; 4 – реактор;
5 – рекупераційна турбіна; 6 – котел-утилізатор; 7 – викидна труба; 8 – топка

Рисунок 1.1 – Схема каталітичного селективного очищення нітрозних газів виробництв нітратної кислоти під тиском 0,73 МПа.

З метою знешкодження NO_x нітрозні газы подаються в підігрівач-сепаратор 1, де з них вилучають пари нітратної кислоти і нагрівають до температури $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ за рахунок теплоти технологічних нітрозних газів. Потім в теплообміннику 2 нагрівають газову суміш до температури від $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ і надалі змішують з гарячими топковими газами з отриманням газової суміші з температурою від $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Природний газ вводять у суміш із розрахунку співвідношення: $\text{CH}_4 : \text{O}_2 = (0,55 - 0,6)$. Газову суміш спрямовують в реактор 4 на паладійвмісний каталізатор де відбувається відновлення NO_x за температури від $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску від $0,45\text{ МПа}$ до $0,57\text{ МПа}$. Газову суміш подають на рекупераційну турбіну 5, де рекуперується теплова енергія і газы за температури від $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $410\text{ }^{\circ}\text{C}$ потрапляють в котел-утилізатор 6. У котлі-утилізаторі газова суміш охолоджується до температури $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ і продукується перегріта пара з температурою $230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після цього газы (склад викидних газів: $\varphi(\text{NO}_x) = \text{від } 0,005\% \text{ до } 0,01\%$; $\varphi(\text{CO}) = 0,13\%$; $\varphi(\text{CH}_4) = 0,4\%$; $\varphi(\text{O}_2) = 0,15\%$) викидаються в атмосферу через 150-метрову викидну трубу 7.

Для відновлення аміаком висококонцентрованих викидних нітрозних газів з концентрацією від 1% до 30% (об) як каталізатори використовують цеоліти. Через адсорбцію на поверхні цеолітів аміаку та оксидів Нітрогену зростає ефективність процесу відновлення за температури від 330 °С до 480 °С.

Недоліками каталітичних методів є можливість отруєння каталізаторів сполуками Сульфуру, закупорювання пор каталізаторів пилом і золою димових газів. Каталітичний спосіб застосовується лише для низькоконцентрованих газів ($\varphi(\text{NO}_x) < 0,5 \%$).

Для усування малих домішок оксидів Нітрогену і з метою одержання чистого газу азоту використовують термокаталітичний метод. Наприклад, для знешкодження газо-повітряної суміші процесу бітумізації труб, як каталізатор процесу використовують гранули оксиду Алюмінію, з нанесеними на них Паладієм або Платиною (від 0,1% мас. до 0,5 % мас.).

Конструктивні особливості контактних апаратів розглянуто в Додатку А.

1.1.2 Селективне високотемпературне некаталітичне відновлення

Каталітичний метод розкладання оксидів Нітрогену використовується лише для газових сумішей з вмістом NO_2 не більше ніж 1% (об) і вмістом кисню – від 4% (об) до 5% (об) [2], а також доцільно для систем, що працюють під тиском. Однак, у промисловості наявна велика кількість виробництв, що викидають у атмосферу нітрозні гази у різних режимах – безперервному та періодичному, до того ж із вмістом оксидів Нітрогену від 3% (об) до 5% (об) та із вмістом кисню від 10% (об) до 20% (об). Потужність таких викидів коливається від декількох сотен до декількох мільйонів метрів кубічних за годину. Каталітичні методи знешкодження небезпечних поллютантів (оксидів Нітрогену) в таких системах використовувати неефективно, до речі і як інші

відомі способи, наприклад, лужні, які є громіздкими та низькопродуктивними (ступінь розкладання складає біля 70%).

Термічне відновлення дозволяє очищувати газові суміші з високим вмістом кисню (понад 5% (об)) (реакції: 1.16 – 1.24).

За низьких концентрацій NO_x , характерних для димових викидів електростанцій та трубчастих печей конверсії природного газу виробництва технологічних газів синтезу аміаку та метанолу перспективним є метод гомогенного відновлення, який ґрунтується на реакціях (реакції: 1.20, 1.21).

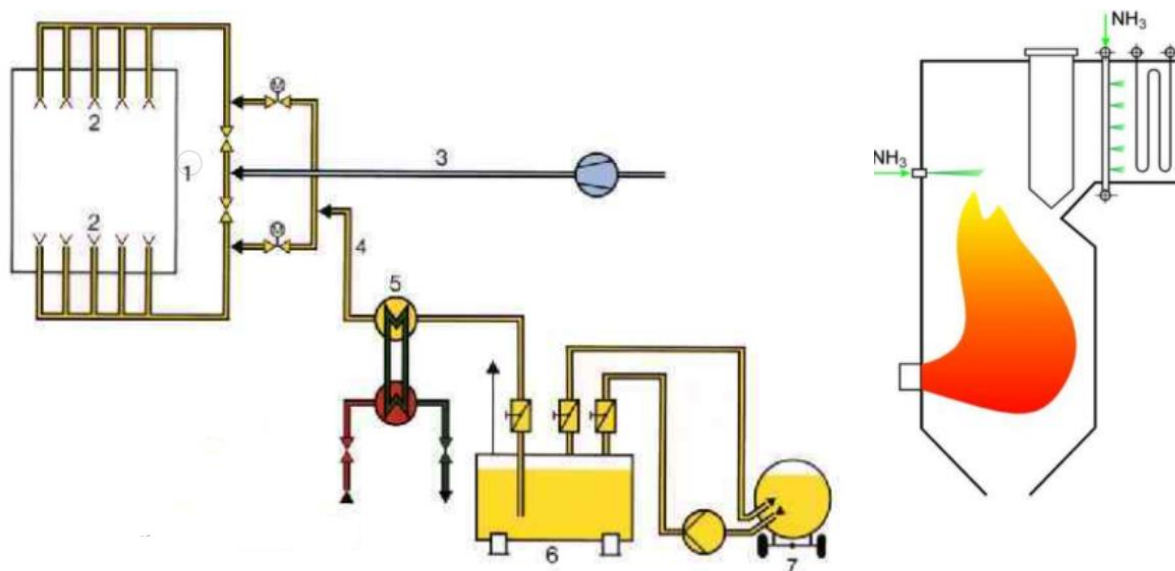


До збільшення ступеню відновлювання у газовій фазі приводить також і збільшення концентрації відновника, але це є економічно не вигідним.

Високотемпературне селективне некаталітичне відновлення (СНКВ) передбачає набагато простіші конструкції схем з невисокими капітальними затратами (Рисунок 2 а, б).

Склад зберігання розчину аміаку включає цистерну 7 з об'ємом біля 200 м^3 , що знаходиться на віддаленні від виробничих приміщень, та бак 6 для зберігання розчину аміаку з робочим об'ємом 13 м^3 , який розташований біля цеху. Розчину аміаку зі швидкістю $1600 \text{ м}^3/\text{год}$ подається у випарник 5 і парогазова суміш потрапляє через розподільчу систему подачі аміаку до котла. Суміш аміаку і пари вводиться у котел у зону температур від 900°C до 1070°C . Розподільча система представляє собою гребінку з труб, кожна з яких має перфоровану поверхню, та розміщується так, що б забезпечити необхідний

час перебігу реакції денітрифікації з врахуванням часу прогріву та перемішування потоків у котлі.



а)

б)

а) 1 – котел; 2 – сопла подачі аміаку; 3 – носій (повітря або пара); 4 – аміак;
5 – випарник; 6 – бак для зберігання аміачної води; 7 – цистерна.

б) принципова конструкція котла з використанням некаталітичного
знешкодження NO_x

Рисунок 2 – Схема селективного некаталітичного відновлення
нітрозних газів.

1.1.3 Адсорбційні методи

Адсорбційні методи ґрунтуються на можливості твердих пористих матеріалів вибірково сорбувати (хемосорбувати) компоненти газової суміші та їх використовують найчастіше для вилучення полютантів з малим вмістом у суміші, а також полютантів, що мають практичну цінність і можуть бути рекуперовані у виробничий цикл.

Адсорбційні методи поширено реалізуються у адсорберах не тільки для знешкодження оксидів Нітрогену, а й для інших газових політантив. Деякі конструкційні особливості адсорберів наведено у **Додатку А**.

Адсорбери поділяють за конструкційними особливостями на: адсорбери з нерухомим шаром адсорбенту, з рухомим шаром адсорбенту, з киплячим шаром, з віброкиплячим шаром. Як адсорбенти використовують пористі матеріали синтетичного та природного походження:

- активне вугілля;
- силікагелі ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$);
- алюмогелі ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$);
- цеоліти (алюмосилікати, що містять оксиди лужних та лужно-земельних металів).
- іоніти (синтетичні високомолекулярні органічні сполуки).

Цеоліти мають регулярну структуру пор, розміри яких співрозмірні з розмірами молекул-адсорбату. Через це цеоліти називають – «молекулярні сіта». Загальна формула – $\text{Me}_{2/n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, де Me – катіон лужного чи лужно-земельного металу, а n – валентність лужного чи лужно-земельного металу.

Регенерацію адсорбенту проводять методом нагрівання, продувки гарячою парою або газом, промивкою регенераційними розчинами. Адсорбери поділяють на апарати безперервної та періодичної дії.

До недоліків треба віднести малі концентрації оксидів Нітрогену в газовій суміші, що підлягає адсорбційному очищенню (від 0,02% до 0,5% (об)). Ефективним адсорбентом є активоване вугілля, але за високих температур і наявності процесу окиснення вугілля виникає небезпека його самовозгоряння, вугілля також має невисоку механічну стійкість.

Недоліками адсорберів з нерухомим шаром адсорбенту є великий гідравлічний опір, періодичність роботи адсорберу, складність процесу регенерації адсорбенту, громіздкість апаратури.

Адсорбери з рухомим шаром сорбенту суміщають в собі всі стадії процесу (адсорбції, регенерації, сушіння, охолодження), чим забезпечують безперервність процесу.

При використанні адсорберів з киплячим шаром зменшується гідравлічний опір шару сорбенту, збільшується площа контакту реагентів і зростає його ефективність. Недоліком є те, що для киплячого шару необхідний однорідний гранулометричний склад адсорбенту та підвищена швидкість подачі газової суміші, що може бути неоптимальною для процесу фізичної адсорбції.

Цей недолік ліквідується у апаратах – адсорберах з віброкиплячим шаром сорбенту, де перемішування досягається за рахунок впливу на шар адсорбенту низкочастотних коливань.

Отже, інтенсифікація процесів, що перебігає в адсорберах, залежить від створення оптимального гідроаеродинамічного режиму, якому відповідає високий ступінь очищення за умови низького гідроаеродинамічного опору. Швидкість руху газової суміші можна збільшувати тільки у використанні адсорбентів с великим розміром пор. За умови використання цеолітів швидкість газу обмежується до діапазону від 0,1 м/с до 0,5 м/с, для киплячого шару до діапазону від 1,5 м/с до 2,0 м/с, для віброкиплячого – від 0,5 м/с до 1,0 м/с. Значно підвищує ступінь вилучення поллютантів впровадження нових типів селективних адсорбентів нового покоління.

1.2 «Мокрі» методи очищення від NO_x

Простим і доступним є метод абсорбційного очищення, який на відміну від «сухих» методів набагато меншою мірою залежить від коливань вихідної концентрації поллютантів і не вимагає використання високих температур. Суть рідкофазних абсорбційних методів полягає у здатності газового компонента розчинятися у воді (абсорбція). Абсорбційні методи поділяють на фізичні та хімічні (хемосорбція). Фізична абсорбція відбувається тоді, коли парціальний

тиск розчиненої речовини над розчином є більшим ніж його рівноважний тиск в газовій фазі.

Спосіб хемосорбції базується на явищі поглинання газів рідкими або твердими речовинами з утворенням хімічних сполук [3]. Більшість реакцій, що використовуються в процесах хемосорбції є екзотермічними та зворотними, тому при нагріванні абсорбенту, хімічна сполука, що утворилася піддається розкладу з виділенням вихідних компонентів. Процес хемосорбції практично не залежить від тиску, тому є більш вигідним при малих значеннях вмісту політантив.

Абсорбційні методи утилізації шкідливих газів поширено реалізуються у абсорберах не тільки для знешкодження оксидів Нітрогену, а й для утилізації багатьох газових політантив. Тому, у **Додатку А** приділено увагу конструкційним особливостям абсорберів і розгляду принципів їх дії для більш глибокого розуміння процесів абсорбції. Перевагою абсорбції оксидів Нітрогену водою є низька вартість абсорбенту, простота способу.

1.2.1 Нерегенеративні методи очищення

1.2.1.1 Окиснювально-абсорбційні методи

Оскільки NO є практично не розчинним у воді, то доцільним виявляється попереднє окиснення NO в газовій фазі безпосередньо перед стадією абсорбції. Окиснювальними агентами можуть бути: O₂, O₃, Cl₂, ClO₂, Cl₂O, повітря, пара HNO₃ тощо. Тобто, суть окиснювально-абсорбційних методів полягає у послідовному окисненні NO до NO₂ та N₂O₃ і поглинанні утворених оксидів Нітрогену рідинними поглиначами (реакція 1.25):



Відомо, що швидкість гомогенного окиснення оксидів Нітрогену є невисокою, у промисловості використовують метод гомогенного окиснення NO в газовій фазі киснем, але це пов'язано з великою витратою O₂, оскільки тільки 1% кисню вступає в реакцію з NO, а решта викидається в атмосферу.

Отже швидкість гомогенного окиснення нітроген(II) оксиду є невисокою, найповільнішою і лімітуючою. Рівновага процесу окиснення NO до NO₂ зміщується в бік утворення продуктів при зменшенні температури, підвищенні тиску та збільшенні концентрацій реагентів, а саме збагаченні повітря киснем. У промисловості для повного окиснення NO до NO₂ процес проводять за температури від 30 °С до 50 °С і тиску від 0,7 МПа до 1,1 МПа. При підвищенні температури рівновага процесу окиснення посувається ліворуч, тому гарячі викидні нітрозні гази охолоджують в котлах-рекуператорах тепла.

Отже процес гомогенного окиснення NO потребує багато часу, підвищеного тиску і великих розмірів апаратів [4].

1.2.1.2 Абсорбційно-окиснювальні методи

Як зазначено вище, через невисоку розчинність NO у воді, метод абсорбції використовують для поглинання нітрозних газів, як правило, при наявності співвідношення: $\frac{NO_2}{NO} \cdot 100 \geq 50\%$ (об). Отже, для покращення ступеню поглинання оксидів Нітрогену водою слід підвищувати вміст NO₂ у реакційній суміші, що також досягається додаванням в абсорбент (воду) окисників: KBrO₃, KMnO₄, H₂O₂, (NH₄)₂Cr₂O₇, NaClO тощо.

При поглинанні NO₂ водою відбувається реакція з утворенням нітратної та нітритної кислот (реакція 1.26):



Для покращення процесу оксиди Нітрогену окиснюють розведеним розчином гідроген пероксиду з отриманням нітратної та нітритної кислот (реакції 1.26 – 1.29) [5]:

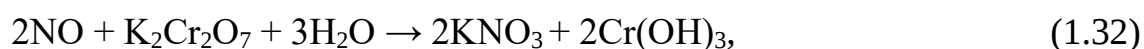


Сама нітритна кислота під дією гідроген пероксиду також легко окиснюється до нітратної кислоти (реакція 1.30):



Швидкість абсорбції збільшується з підвищенням тиску (0,1 МПа), зниженням температури ($\approx 40^\circ\text{C}$) і використанням збагачених за вмістом нітроген(IV) оксидом викидних газів.

Окиснення розчинами окиснювачів (калій перманганату, калій дихромату, озону) описується наступними схемами (реакції 1.31 – 1.33):



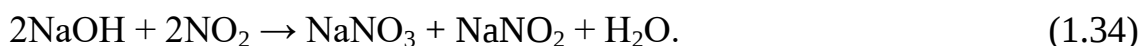
Швидкість окиснення NO при використанні розчинів окиснювачів збільшується від 2 до 3 разів, але при цьому зростає вартість процесу.

Натомість прискорити реакцію окиснення можна за рахунок використання каталізаторів. Так, за низьких температур є активними каталізатори адсорбційного типу (активне вугілля, цеоліти тощо), які за температури від 50°C до 80°C і вмісті $\omega(\text{NO}) \approx 1,5\%$ прискорюють процес від 35 до 65 разів. У діапазоні високих температур ($\approx 360^\circ\text{C}$) активними є каталізатори на основі Кобальту та Ніколю, з додаванням оксидів Цирконію, Мангану, Аргентуму.

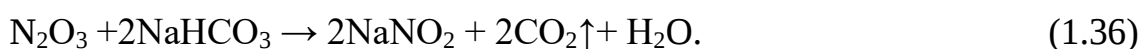
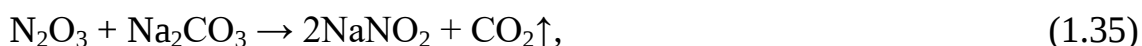
Слід зазначити, що методи абсорбції для найбільш повного поглинання оксидів газів Нітрогену, що міститься у викидних газах, передбачають невисоку лінійну швидкість (до 6 м/с), що в умовах реальних газових викидів не виконується, оскільки реальна швидкість є набагато вищою. До недоліків відноситься невисока здатність до абсорбції оксидів Нітрогену, особливо NO, що є лімітуючою стадією процесу, і потребує великих витрат води. При додаванні гідроген пероксиду збільшується ступінь вилучення NO_x , але збільшується вартість способу та експлуатаційні витрати.

1.2.1.3 Абсорбція лугами та солями

Для підвищення ступеню очищення повітря від NO_x як поглиначі використовують розчини лугів. У загальному вигляді процес лужного методу нейтралізації оксидів Нітрогену можна представити так (реакція 1.34):



Нітроген (III) оксид поглинається розчинами не тільки лугів, але і солей (реакції 1.35, 1.36):



Порівняльна характеристика активності лужних розчинів та суспензій як поглиначів N_2O_3 представлена наступним рядом: $\text{KOH} > \text{NaOH} > \text{Ca(OH)}_2 > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{K}_2\text{CO}_3 > \text{Ba(OH)}_2 > \text{NaHCO}_3 > \text{KHCO}_3 > \text{MgCO}_3 > \text{BaCO}_3 > \text{CaCO}_3 > \text{Mg(OH)}_2$.

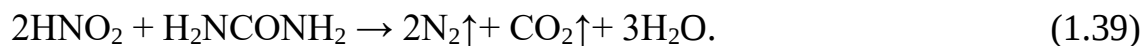
У процесах абсорбції розчинами лугів і солей суттєву роль відіграє масообмін і тому, підвищенню ефективності поглинання оксидів Нітрогену сприяє вибір належної конструкції абсорбційного апарату: пінні та тарілчасті абсорбери, скрубери тощо (див. Додаток А).

1.2.1.4 Абсорбційно-відновлювальні методи очищення (окиснювально-абсорбційно-відновлювальні)

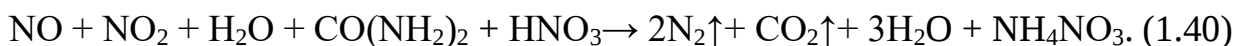
Використання абсорбційно-відновлювальних методів передбачає використання карбаміду ($\text{CO(NH}_2)_2$), амоній гідроксиду (NH_4OH), амоній карбонату ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$), сульфамілової кислоти ($\text{NH}_2\text{SO}_2\text{OH}$), амін гідроксиду (гідроксиламіну) (NH_2OH), солей Феруму(II) тощо.

Використання розчину карбаміду для очищення газових викидів оксидів Нітрогену зумовлено низькою вартістю карбаміду та можливістю очищення суміші газів з нестабільним складом (змінним вмістом оксидів Нітрогену) і наявністю в суміші інших речовин (SO_2 , пилю, HCl).

Стадія абсорбції та відновлення описується схемами (реакції 1.37 – 1.39):

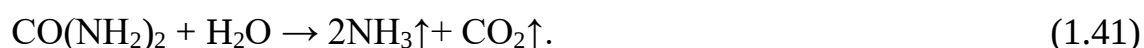


Сумарну реакцію, за якою відбувається очищення від викидів оксидів Нітрогену описується схемою (реакція 1.40):



Максимальний ступінь очищення відповідає концентрації розчину карбаміду від 8% до 12% і температурі від 48 °С до 92 °С.

Слід зазначити, що з підвищенням температури погіршується абсорбція оксидів Нітрогену та підсилюється гідроліз карбаміду з виділенням аміаку (реакція 1.41):



За аналогічною схемою реагують оксиди Нітрогену з водним розчином аміаку. При цьому утворюється амоній нітрит, який є нестійкою сполукою і розкладається з утворенням води і молекулярного азоту. Метод аміачного очищення є ефективним для знешкодження димових викидів за рахунок того, що процес поглинання відбувається водночас і у рідині, і у паро-газовій фазі парою аміаку з утворенням туману аерозолі амоній нітриту. Сумарно процес можна представити так (реакція 1.42):



Окиснювально-абсорбційно-відновлювальний метод використовується для оптимізації процесу відновлення карбамідом нітритної і нітратної кислот. Для цього нітроген(II) оксид додатково окиснюють у газовій фазі перед стадією абсорбційного поглинання розчином карбаміду до співвідношення $\text{NO}/\text{NO}_2 = 1$. За таких умов ступінь відновлення NO_2 розчином карбаміду зростає від 4% до 60%.

Використання лугів потребує великих капітальних витрат (вартість реактантів, антикорозійне обладнання). Ступінь вилучення є не дуже високим,

але з використанням дво- та тристадійних схем абсорбції вдається досягнути санітарних норм очищення. Отримані розчини солей потребують подальшої переробки, також в процесі утворюється карбон(IV) оксид, що викидається в атмосферу.

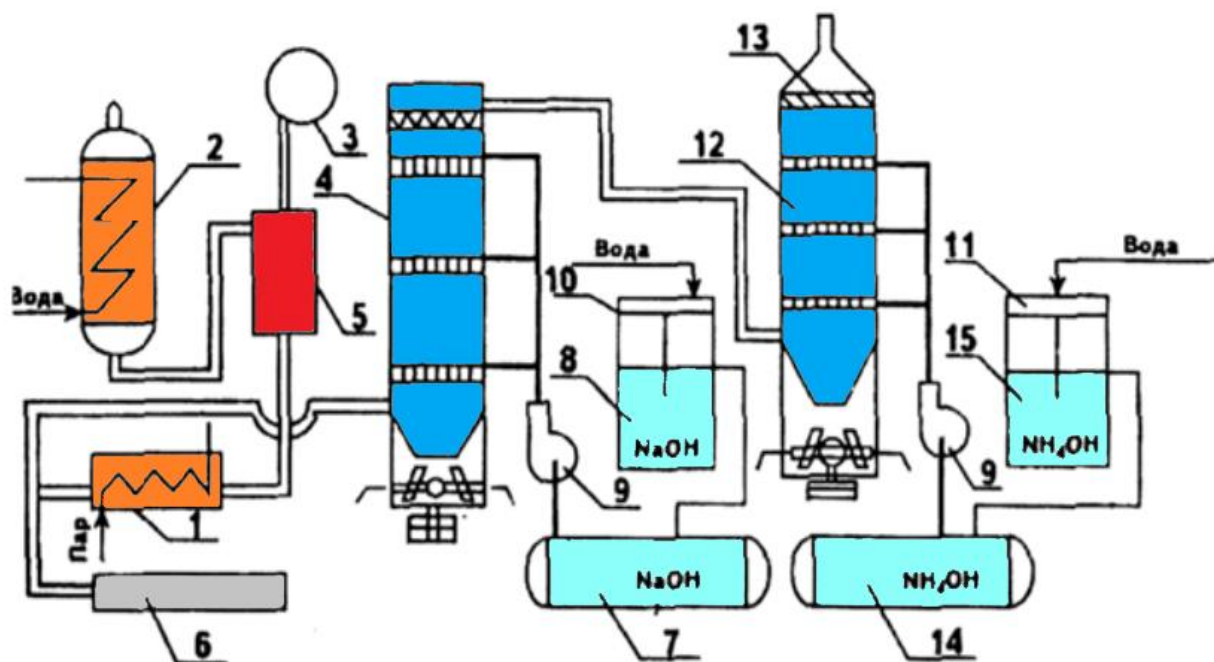
У загальному сенсі найбільш часто використовують: насадкові; барботажні; розпилювальні абсорбери (див. **Додаток А**).

Широковживаною схемою абсорбційного очищення газових викидів від оксидів Нітрогену є схема очищення аміачним методом (Рисунок 3).

На першому ступені очищення (абсорбер 4) вентиляційних викидів оксидів Нітрогену високої концентрації як абсорбент використовують водний розчин натрію гідроксиду ($\omega(\text{NaOH}) = (8\% - 10\%)$), який подають на зрошення з баку 7. Другий ступінь очищення (абсорбер 12) від NO_x реалізується з використанням водного розчину аміаку ($\omega(\text{NH}_4\text{OH}) = (1,5\% - 2\%)$), що надходить в абсорбер з баку 14.

Вентиляційні гази перед тим як потрапити на стадію абсорбції проходять попереднє очищення (часточки компресорного масла і каталізаторного пилу) та через прилад подачі газу 6 потрапляють в абсорбер першого ступеню. За умови якщо температура газу нижча, ніж 0°C , газ підігрівають у теплообміннику 1, у міжтрубний простір якого подають пару.

Якщо вихідний газ має температуру від 250°C до 350°C , то у ньому може бути підвищений вміст NO , тому крім охолодження в апараті 2 його піддають окисненню в камері окиснення 5. Ємності 8 та 15 слугують для приготування відповідно водних розчинів NaOH і NH_4OH .



1, 2 – теплообмінники; 3 – вентиль; 4, 12 – абсорбери; 5 – камера окиснення NO; 6 – прилад подачі газу; 7, 8, 14, 15 – баки для зберігання розчинів лугів; 10, 11 – прилади вимірювання рівня рідини; 13 – відбійники.

Рисунок 3 – Схема двохступеневої промислової установки очищення газів від оксидів Нітрогену аміачним методом.

Наведені методи знешкодження оксидів Нітрогену мають, як зазначалося вище, певні недоліки та перемоги, що наведено у таблиці 1.

Таблиця 1.1 – Характеристики фізико-хімічних процесів технологій очищення газових викидів від оксидів Нітрогену

Відновлювальні каталітичні методи	
Переваги	Недоліки
1. Використання як відновника карбон(II) оксиду з точки зору	1. Утворення CO ($\varphi(\text{CO}) < 0,15\%$) і CO ₂ , деяких інших токсичних речовин, а також необхідність

одночасного знешкодження двох токсичних речовин. 2. Селективність відновлення, яка не залежить від наявності кисню у газовій суміші на відміну від решти відновників.	використання низькоконцентрованих газових сумішей ($\varphi(\text{NO}_x) < 0,5 \%$) з постійним складом. 2. Використання токсичних CO, NH ₃ , яка потребує окремих умов проведення процесу, використання антикорозійного обладнання. Висока вартість H ₂ .
Селективне високотемпературне некаталітичне відновлення	
Переваги	Недоліки
1. Можливість використання способу термічного розкладання для газових сумішей з будь-яким початковим вмістом NO. 2. Використання набагато простіших конструкції схем з невисокими капітальними затратами. 3. Можливість за умови використання термічного відновлення очищувати газові суміші з високим вмістом кисню (понад 5% (об)).	1. Залежність умов проведення процесу від температури, інтенсивності перемішування та часу перебування реактантів в зоні реакції. 2. Необхідність для збільшення ступеню відновлювання у газовій фазі застосовувати великі концентрації відновника, що є економічно не вигідним.
Абсорбція водою	
Переваги	Недоліки

1. Збільшення швидкості абсорбції з підвищенням тиску (0,1 МПа), зниженням температури ($\approx 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) і використанням збагачених за вмістом оксидів Нітрогену викидних газів. 2. Низька вартість абсорбенту, простота способу. Конструкції абсорберів і адсорберів дозволяють збільшити площу контакту реагентів (використання режиму протитечії, різноманітних видів насадки, різноманітних конструкцій тарілок тощо).	1. Обмеження лінійної швидкості потоку газу (до 6 м/с) для найбільш повного поглинання оксидів Нітрогену, що в умовах реальних газових викидів не виконується, оскільки реальна швидкість є набагато вищою. Невисока абсорбційна здатність оксидів Нітрогену, особливо NO, що є лімітуючою стадією процесу і потребує великих витрат води. 2. Періодичність дії абсорберів/адсорберів за необхідності регенерації поглиначів.
Абсорбція лугами та солями та абсорбційно-відновлювальні методи	
Переваги	Недоліки
1. Збільшення ступеню вилучення політантів у порівнянні з використанням методу фізичної абсорбції водою. 2. Використання карбаміду є низьковартісним способом і надає можливість шкідливі оксиди	1. Великі капітальні витрати (вартість реагентів, антикорозійне обладнання). 2. Отримані розчини солей потребують подальшої переробки і, до того ж, в процесі утворюється

Нітрогену перетворювати у нейтральний азот.	карбон(II) оксид, що викидається в атмосферу.
Адсорбційні методи	
Переваги	Недоліки
1. Можливість використання методу для вилучення поллютантів з малим вмістом у суміші, а також поллютантів, що мають практичну цінність і можуть бути рекуперовані у виробничий цикл. 2. Можливість поєднання всіх стадій процесу (адсорбції, регенерації, сушіння, охолодження) в адсорберах з рухомим шаром сорбенту забезпечує безперервність процесу. 3. За умови використання адсорберів з киплячим шаром зменшується гідравлічний опір шару сорбенту, збільшується площа контакту реагентів і зростає його ефективність. 4. За умови застосування віброкиплячого шару сорбенту, де перемішування досягається за рахунок впливу на шар адсорбенту низкочастотних коливань, зменшується витрата повітря і створюється оптимальний гідродинамічний режим, якому відповідає високий ступінь очищення	1. Довготривалість процесу, його періодичність, необхідність перезавантаження адсорбенту та його регенерації. 2. Необхідність контролю рН, температури середовища, ступеню насичення сорбенту. 3. Утворення великої кількості регенераційних розчинів та необхідність їх утилізації. 4. Невисокі концентрації оксидів нітрогену (0,02 – 0,5) % (об) в газовій суміші, що йде на адсорбційне очищення.

при низькому гідроаеродинамічному опорі.

5. Підвищення ступеню вилучення поллютантів через впровадження нових типів, селективних адсорбентів нового покоління (модифіковане активоване вугілля, кокс, складні сорбенти на основі лужних або лужноземельних металів на носіях (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO), солі амонію, торфолужні або вуглелужні суміші, цеоліти, полімерні сорбенти на основі стиролу, дивінілбензолу, трибутилфосфату) [8].

5. Виникнення потенційної небезпеки самовозгоряння активованого вугілля за високих температур і процесу окиснення, невисока механічну стійкість вугілля.

6. Великий гідравлічний опір адсорберів з нерухомим шаром адсорбенту.

7. Необхідність дотримання однорідного гранулометричного складу адсорбенту для адсорберів з киплячим шаром та підтримання підвищеної швидкості подачі газової суміші, що є нераціональною для процесу фізичної адсорбції.

8. Обмеження швидкості руху газової суміші через необхідність використання адсорбенту з малим розміром пор. За умови використання цеолітів швидкість газу обмежується до (0,1 – 0,5) м/с,

	для киплячого шару до (1,5 – 2,0) м/с, для віброкиплячого до (0,5 – 1,0) м/с.
Окиснювально-абсорбційні методи	
Переваги	Недоліки
1. Метод не потребує додаткових реагентів, окрім повітря. 2. Умови процесу окиснення не потребують високих температур (30 – 50)°С, тому гарячі викидні нітрозні гази охолоджують в котлах-рекуператорах, отримане тепло може бути використано на потреби виробництва або на комунальні потреби.	1. Невисока швидкість гомогенного окиснення оксидів нітрогену в газовій фазі, що є найповільнішою і лімітуючою стадією, що пов'язано з великою витратою O₂. 2. Процес гомогенного окиснення NO потребує багато часу, підвищеного тиску і великих розмірів апаратів.

2 РОЗРАХУНКИ ОБОВ'ЯЗКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ ВИРОБНИЦТВА

2.1 Індекс забруднення атмосфери (ІЗА)

ІЗА кількісно характеризує рівень забруднення окремою домішкою (забруднюючою речовиною), що враховує різницю в швидкості зростання ступеня шкідливості речовин, приведенного до ступеня шкідливості сульфур(IV) оксиду, зі зростанням перевищення ГДК.

$$ІЗА = \left(\frac{C_i}{ГДК_i} \right)^{K_i}, \quad (2.1)$$

де C_i – середня концентрація в повітрі i -ої речовини;

$ГДК_i$ – гранично допустима середньодобова концентрація для i -ої речовини;

K_i – безрозмірна константа приведення ступеня шкідливості i -ої речовини до шкідливості сульфур(IV) оксиду, яка залежить від того, до якого класу небезпеки належить забруднююча речовина.

Для розрахунку комплексного ІЗА забруднення атмосфери як правило використовують значення ІЗА п'яти речовин:

$$ІЗА_5 = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{C_i}{ГДК_i} \right)^{K_i} \quad (2.2)$$

Усі нормовані речовини поділені на класи небезпеки (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Класи небезпеки нормованих речовин

Клас небезпеки	Ступінь небезпеки	ГДК, мг/м ³	K_i
I	Надзвичайно небезпечні	< 0, 1	1,7
II	Високо небезпечні	0,1-1,0	1,3
III	Помірно небезпечні	1,0 - 10,0	1,0
IV	Мало небезпечні	>10	0,9

У разі наявності в атмосферному повітрі кількох забруднюючих речовин, що мають здатність до сумарної дії, їх сумарно допустима концентрація має відповідати умові:

$$\frac{C_1}{ГДК_1} + \frac{C_2}{ГДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ГДК_n} \leq 1 \quad (2.3)$$

де C_1, C_2, C_3 – фактична концентрація речовин в атмосферному повітрі при одночасному відбиранні проб в одній місцевості, мг/м³;

ГДК₁, ГДК₂, ГДК₃ – гранично допустимі концентрації цих речовин в атмосферному повітрі, мг/м³.

У таблиці 2.2 наведено ГДК деяких найпоширеніших шкідливих речовин в атмосферному повітрі.

Таблиця 2.2 – Гранично допустимі концентрації деяких шкідливих речовин у повітрі населених пунктів, мг/м³.

Речовина	ГДК _{с.д.}	ГДК _{м.р.}
Тверді речовини (пил)	0,15	0,2
Сульфур(IV) оксид	0,05	0,5
Нітроген(IV) оксид	0,04	0,085
Нітроген(II) оксид	0,06	0,4
Карбон(II) оксид	3,0	5,0
Аміак	0,04	0,2
Гідроген хлорид (хлористий водень) (HCl)	0,2	0,2
Гідроген ціанід (ціанистий водень) (HCN)	0,01	-
Кадмій(II) оксид	0,001	-
Плюмбум (Свинець)	0,0003	0,03
Гідроген сульфід (сірководень) (H ₂ S)	0,005	0,03
Бенз(а)пірен	0,000001	-

Фенол	0,003	0,01
Формальдегід	0,003	0,035
Гідроген флуорид (фтороводень) (HF)	0,005	0,2

2.2 Розрахунок наднормативних викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря

Розрахунки наднормативних викидів (M_i) в тонах здійснюються шляхом визначення різниці між фактичними і дозволеними потужностями викидів, з урахуванням часу роботи джерела в режимі наднормативного викиду. Розрахунок виконується за формулою 2.4:

$$M_i = 0,0036 \cdot (V_i^{\phi} C_i - M_{qi}) \cdot t, \text{ г/с} \quad (2.4)$$

де V_i^{ϕ} – об’ємна витрата газопилового потоку на виході з джерела, $\text{м}^3/\text{с}$;

C_i – середня концентрація i -ої забруднюючої речовини (із серії відібраних проб), що розрахована як середня арифметична, $\text{г}/\text{м}^3$;

M_{qi} – потужність дозволеного викиду i -ої забруднюючої речовини по даному джерелу, що встановлена дозволом на викид, г/с ;

t – час роботи джерела в режимі наднормативного викиду, годин.

Термін роботи джерела в режимі наднормативного викиду визначається з моменту виявлення порушення до моменту його усунення, підтвердженого даними контрольної перевірки, з урахуванням фактично відпрацьованого часу.

Якщо за даними вимірів, зафіксованих в журналах первинної облікової документації підприємства, неодноразово виявлялося перевищення встановленого нормативу за даним джерелом і речовині, то термін роботи джерела в режимі наднормативного викиду береться з часу введення нормативу в дію за даним джерелом і речовині до дня контрольної перевірки, але не більше як за один астрономічний рік.

Розрахунки потужності викидів забруднюючих речовин по джерелах або речовинах, які не мають дозволу на викид, ведуться на основі потужності фактичного викиду, визначеної інструментальними вимірами. При цьому час роботи джерела в режимі наднормативного викиду визначається з моменту виявлення порушення до моменту оформлення дозволу на викид.

На першому етапі роботи необхідно визначити витрату газоповітряної суміші за температури викиду (T_B).

Витрату газоповітряної суміші визначають за формулою (2.5):

$$V_i = a_0 \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.5)$$

де a_0 – швидкість руху газової суміші, м/с;

D – діаметр устя джерела викиду.

Після цього визначають витрату газів за T °С, з урахуванням температурної зміни об'єму газу:

$$V_i^\phi = \frac{273}{273 + (T_B - 20)} \cdot V_i, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.6)$$

Знаючи витрату газової суміші за певної температури та концентрацію домішок (C_i) визначають потужність викиду за кожним компонентом (формула 2.4).

2.3 Розрахунок розмірів відшкодування збитків за наднормативні викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря

Розрахунок ведеться на основі розміру мінімальної заробітної плати з урахуванням обсягів наднормативних викидів і регулюючих коефіцієнтів. Розмір компенсації збитків в одиницях національної валюти визначається за формулою (2.7):

$$Z = M_i \cdot 1,1П \cdot A_i \cdot K_T \cdot K_{zi}, \quad (2.7)$$

де Z – розмір компенсації збитків, одиниць національної валюти;

M_i – маса i -ої забруднюючої речовини, що викинута в атмосферне повітря понад нормою, тонни;

$1,1P$ – базова ставка компенсації збитків в частках мінімальної заробітної плати (P) за одну тонну умовної забруднюючої речовини на момент перевірки, одиниць національної валюти/тонну;

A_i – безрозмірний показник відносної небезпечності i -ої забруднюючої речовини;

K_m – коефіцієнт, що враховує територіальні соціально-екологічні особливості;

K_{zi} – коефіцієнт, що залежить від рівня забруднення атмосферного повітря населеного пункту i -ою забруднюючою речовиною.

Безрозмірний показник відносної небезпеки i -ої забруднюючої речовини (A_i) визначається із співвідношення за формулою (2.8):

$$A_i = \frac{1}{ГДК_i}, \quad (2.8)$$

де $ГДК_i$ – середньодобова гранично допустима концентрація або орієнтовно безпечний рівень впливу (ОБРВ) i -ої забруднюючої речовини, мг/м³.

Для речовин з $ГДК$ більше одиниці, в чисельнику вводиться поправочний коефіцієнт 10. Для речовин, по яких відсутня величина середньодобової гранично допустимої концентрації, при визначенні показника відносної небезпечності береться величина максимальної разової $ГДК$ забруднюючої речовини в атмосферному повітрі. Для речовин, по яких відсутні величини $ГДК$ показник відносної небезпечності A_i приймається рівним 500.

Коефіцієнт, що враховує територіальні соціально-екологічні особливості (K_T), залежить від чисельності жителів населеного пункту:

$$K_T = K_{HAC} \cdot K_{\Phi}, \quad (2.9)$$

де K_{HAC} – коефіцієнт, що залежить від чисельності жителів населеного пункту і визначається за таблицею 2.3;

K_{ϕ} – коефіцієнт, що враховує народногосподарське значення населеного пункту і визначається за таблицею (2.4).

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти відносної чисельності населення.

Чисельність населення, тис.чол.	$K_{НАС}$
До 100	1,00
100,1 – 250	1,20
250,1 – 500	1,35
500,1 – 1000	1,55
більше 1000	1,80

Таблиця 2.4 – Коефіцієнти, що враховують народногосподарське значення населеного пункту.

Тип населеного пункту	K_{ϕ}
I Організаційно-господарські та культурно-побутові центри місцевого значення з перевагою аграрно-промислових функцій (районні центри, міста, селища районного підпорядкування) та села	1,00
II Багатофункціональні центри, центри з перевагою промислових і транспортних функцій (обласні центри, міста обласного підпорядкування, великі промислові та транспортні вузли)	1,25
III Центри з перевагою рекреаційних функцій *	1,65

* Якщо населений пункт одночасно має промислове та рекреаційне значення, застосовується коефіцієнт $K_{\phi} = 1,65$.

Коефіцієнт, що залежить від рівня забруднення атмосферного повітря населеного пункту і-ою забруднюючою речовиною (K_{zi}), визначається за формулою (2.10):

$$K_{zi} = \frac{q}{ГДК_{ci}}, \quad (2.10)$$

де q – середньорічна концентрація і-ої забруднюючої речовини за даними прямих інструментальних вимірів на стаціонарних постах за попередній рік, мг/м³;

$ГДК_{ci}$ – середньодобова гранично допустима концентрація і-ої забруднюючої речовини, мг/м³.

У випадку, коли в даному населеному пункті інструментальні виміри концентрації даної забруднюючої речовини не виконуються, а також, коли рівні забруднення атмосферного повітря населеного пункту і-ою забруднюючою речовиною не перевищують ГДК, значення коефіцієнта K_{zi} приймається рівним одиниці.

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Розрахунок наднормативних викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря та розрахунок розмірів відшкодування збитків за наднормативні викиди

Приклад 1. Обчисліть індекс забруднення атмосфери, якщо викиди в атмосферу карбон(II) оксиду перевищують ГДК у 3 рази, гідроген хлориду – в 2 рази, сульфур(IV) оксиду – у 1,5 рази, аміаку – у 1,9 рази, нітроген(IV) оксиду – в 1,3 рази.

Розв'язання:

Згідно умов задачі перевищені викиди в атмосферу забрудників складають:

викиди (CO) = 3 ГДК; викиди (HCl) = 2 ГДК; викиди (SO₂) = 1,5 ГДК; викиди (NH₃) = 1,9 ГДК; викиди (NO₂) = 1,3 ГДК.

Використовуючи формулу 2.2 записуємо: $ІЗА_5 = (3 \cdot 3 \text{ мг/м}^3 / 3 \text{ мг/м}^3)^1 + (2 \cdot 0,2 \text{ мг/м}^3 / 0,2 \text{ мг/м}^3)^{1,3} + (1,5 \cdot 0,05 \text{ мг/м}^3 / 0,05 \text{ мг/м}^3)^{1,7} + (1,9 \cdot 0,04 \text{ мг/м}^3 / 0,04 \text{ мг/м}^3)^{1,7} + (1,3 \cdot 0,04 \text{ мг/м}^3 / 0,04 \text{ мг/м}^3)^{1,7} = 3^1 + 2^{1,3} + 1,5^{1,7} + 1,9^{1,7} + 1,3^{1,7} = 3 + 2,46 + 1,99 + 2,97 + 1,56 = 11,99$.

Приклад 2. На хімічному підприємстві міста Києва під час контрольної перевірки зафіксовано середню концентрацію викиду карбон(IV) сульфід (сірковуглецю) 96,004 мг/м³ за об'ємною витратою 191,7 м³/с. Середньодобова ГДК_{с.д.} карбон(IV) сульфід (CS₂) дорівнює 0,005 мг/м³. Середньорічна концентрація карбон(IV) сульфід по місту Києву за даними стаціонарних постів спостережень складає 0,006 мг/м³;

Тимчасово погоджений викид карбон(IV) сульфід встановлений дозволом становить:

$$Mq(CS_2) = 13,304 \text{ г/с.}$$

Обчисліть наднормативні викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря та розміри відшкодування збитків за наднормативні викиди якщо наднормативні викиди тривали 77 діб.

Розв'язання:

За даними журналу первинної облікової документації зафіксовано перевищення встановленого нормативного викиду по даному джерелу викидів і речовині. У зазначений строк порушення було усунене. За цей період джерело працювало цілодобово. Таким чином, час роботи джерела в режимі наднормативного викиду береться з часу останнього зафіксованого порушення і становить:

$$24 \text{ год.} \cdot 77 \text{ діб} = 1848 \text{ год.}$$

Потужність викиду карбон(IV) сульфідy, що здійснюався з перевищенням тимчасово погоджених нормативів, розраховується за формулою (2.4) і має наступний вираз:

$$M = 0,0036 (191,7 \cdot 0,096 - 13,304) \cdot 1848 = 33,9 \cdot 3600 = 122,040 \text{ кг} = 0,122040 \text{ т},$$

де 191,7 – об’ємна витрата газоповітряної суміші, м³/с;

0,096 – середня концентрація карбон(IV) сульфідy в газоповітряній суміші із серії відібраних проб, г/м³;

13,304 – тимчасово погоджений викид карбон(IV) сульфідy, г/с;

1848 – час роботи джерела з перевищенням тимчасово погодженого викиду, годин.

Розмір компенсації збитків розраховується за формулою (2.7) і становить:

$$Z = 0,122040 \cdot 1,1 \cdot 6000 \cdot 200 \cdot 2,25 \cdot 1,2 = 434950,56 \text{ грн},$$

де 0,122040 – маса карбон(IV) сульфідy, що викинута в результаті перевищення тимчасово погодженого викиду, яка знаходиться як різниця викиду встановленого дозволом за 1848 годин і фактичного розрахованого викиду, т;

1,1 – базова ставка компенсації збитків в частках мінімальної заробітної плати за одну тонну умовної забруднюючої речовини;

6000 – розмір мінімальної заробітної плати на момент перевірки, грн;

200 – показник відносної небезпечності карбон(IV) сульфідy (A_i), який розраховується за формулою (2.8):

$$A = 1/0,005 = 200,$$

де 0,005 – середньодобова ГДК карбон(IV) сульфідy, мг/м³;

2,25 – коефіцієнт (K_T), що враховує територіальні соціально-екологічні особливості м. Києва, розраховується за формулою (2.9):

$$K_T = 1,8 \cdot 1,25 = 2,25,$$

1,8 – коефіцієнт (K_{HAC}), приймається, виходячи з таблиці 2.3;

1,25 – коефіцієнт (K_ϕ), приймається виходячи з таблиці 2.4;

1,2 – коефіцієнт (K_z), який залежить від рівня забруднення атмосфери м. Києва карбон(IV) сульфідом, розраховується за формулою (2.10):

$$K_z = 0,006/0,005 = 1,2,$$

0,006 – середньорічна концентрація карбон(IV) сульфідів по м. Києву за даними стаціонарних постів спостережень, мг/м^3 ;

0,005 – середньодобова ГДК карбон(IV) сульфідів, мг/м^3 .

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІНОЇ РОБОТИ

1. Обчисліть індекс забруднення атмосфери, якщо викиди в атмосферу карбон(II) оксиду перевищують ГДК у 2 рази, пилу – у 2 рази, формальдегід – у 1,1 рази, водень сульфід – у 1,7 рази, водень флуорид – у 1,6 рази.
2. На хімічному підприємстві міста Черкаси під час контрольної перевірки зафіксовано середню концентрацію викиду нітроген(IV) оксиду $110,06 \text{ мг/м}^3$ при об'ємній витраті $170,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Середньодобова ГДК_{с.д.} дорівнює $0,04 \text{ мг/м}^3$. Середньорічна концентрація нітроген (IV) оксиду по місту Черкаси за даними стаціонарних постів спостережень нітроген(IV) оксиду складає $0,05 \text{ мг/м}^3$.

Тимчасово погоджений викид нітроген(IV) оксиду встановлений дозволом становить:

$$M_q(\text{NO}_2) = 9,75 \text{ г/с}.$$

Обчисліть наднормативні викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря та розміри відшкодування збитків за наднормативні викиди.

3 НОРМУВАННЯ ВМІСТУ ПОЛЮТАНТІВ

Екологічний моніторинг – процеси прогнозування, оцінювання, систематизації та аналізу інформації щодо змін навколишнього середовища через шкідливий вплив антропогенних, техногенних та природних факторів.

Розробка дієвих заходів щодо запобігання руйнування та отруєння довкілля, а також прийняття заходів щодо зменшення шкоди біосистемі.

Екологічна експертиза – здійснює аналіз і оцінювання проектної документації, що є чинною для забезпечення виробничої та будь-якої господарської діяльності, реалізація і дія якої може негативно впливати або впливає на стан навколишнього природного середовища та здоров'я людей.

ГДК – концентрації шкідливих речовин у певному середовищі, вживання яких людиною практично не впливають на його здоров'я і не викликають несприятливих наслідків у його потомства.

ГДК_{робочої зони} – концентрації токсичних хімічних речовин у вигляді парів, газів, пилу, що за умови щоденного впливу протягом робочого дня не викликає патологічних станів здоров'я, захворювань у робітника та його потомства.

ГДК_{середньодобова} – гранична концентрація, що протягом життя людини не повинна шкідливо впливати на нього, і не впливати на стан довкілля у цілому.

ГДК_{максимально разова} – визначає ступінь короточасного впливу (20 хв) поллютанта на організм людини.

Поллютанти поділяються: надзвичайно небезпечні (1 клас небезпеки), небезпечні (2 клас небезпеки), помірно небезпечні (3 клас небезпеки), малонебезпечні (4 клас небезпеки).

За умови одночасної дії декількох токсичних речовин діє правило згідно формули (3.1):

$$C_1/\text{ГДК}_1 + C_2/\text{ГДК}_2 + \dots + C_n/\text{ГДК}_n < 1 \quad (3.1)$$

Якщо підприємство планується будувати у районі, де повітря забруднюється іншими джерелами токсикатів, то необхідно враховувати концентрацію забрудників і нормувати викиди шкідливих речовин у повітря, враховуючи вже присутні домішки, тобто фонові концентрації.

Фонова концентрація – концентрація токсиканта у атмосфері, що створюється всіма джерелами природного та антропогенного впливу, виключаючи ті поллютанти, що розглядаються для обмеження.

Згідно чинної Конституції України кожному громадянину гарантується право на безпечне для життя і здоров'я довкілля (екологічну безпеку), передбачається відшкодування збитків, завданих порушенням цього права (ч. 1 ст. 50), право громадян на вільний доступ до екологічної інформації, в тому числі про якість харчових продуктів, предметів ужитку (ч. 2 ст. 50).

Індекс якості повітря (AQI – air quality index), використовується для інформування населення про рівень забруднення повітря.

- від 100 до 150 (жовтий) вважається, що якість повітря прийнятна;
- від 151 до 200 (помаранчевий) – якість повітря не відповідає вимогам для чутливих груп населення, що можуть відчувати нездужання;
- від 201 до 250 (червоний) – будь-яка людина може відчувати нездужання, а групи людей з чутливих груп можуть мати серйозні наслідки для здоров'я.
- від 251 до 300 (фіолетовий) – недопустима якість повітря, що вимагає попередження про стан надзвичайної ситуації для здоров'я при якому слід обмежувати присутність на відкритому повітрі.
- 301 і вище (бордовий) – загрозна і небезпечна якість повітря для здоров'я всіх груп людей.

Для кількісного оцінювання ГДК використовують наступні одиниці виміру: мг/дм³, мг/м³, ppm.

Мільйонна частка або пропромиле – одиниця вимірювання концентрації, що являє собою одну мільйонну частку. Позначається скороченням ppm (англ.: Parts per million).

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Перерахунок концентрацій та розрахунок гранично допустимих концентрацій у робочих приміщеннях

Оскільки ГДК може бути визначена для рідких, твердих та газоподібних речовин, розрізняють одну мільйонну частку по масі та об'єму (1 ppmw і 1 ppmv відповідно).

Якщо одна тонна складається з 1000 000 г, а один кг – з 1000 000 мкг, то справедливим є вираз (формула 3.2):

$$1 \text{ ppmw} = 1 \text{ г/т} = 1 \text{ мкг/кг.} \quad (3.2)$$

Для об'ємних часток (формула 3.3):

$$1 \text{ ppmv} = 1 \text{ см}^3/\text{м}^3. \quad (3.3)$$

Формула (3.4), що поєднує числові значення ppm з ГДК газового компоненту, виглядає наступним чином:

$$\varphi = \frac{\text{ГДК(мг/м}^3\text{)} \cdot V_m(\text{ст.ум})}{Mi} = \frac{(\text{ГДК(мг/м}^3\text{)}/1000) \cdot 24,04 \text{ дм}^3}{Mi(\text{г/моль})}, \quad \% \quad (3.4)$$

де ГДК (мг/м³) – визначені нормативними документами [9] значення ГДК газу, мг/м³;

$V_m(\text{ст.ум})$ – молярний об'єм газу за стандартних умов ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 101,3 \text{ кПа}$);

Mi – молярна маса газу, г/моль.

Виходячи з об'єднаного закону Бойля-Маріотта та Гей-Люссака молярний об'єм газу за стандартних умов становить:

$$V_m = \frac{P_0 \cdot V_0 \cdot T_{\text{ст.у.}}}{P \cdot T_{\text{н.у.}}} = 24,04 \text{ дм}^3, \quad (3.5)$$

де $T_{\text{н.у.}} = 273 \text{ К}$;

$T_{\text{ст.у.}} = 293 \text{ К}$;

$V_0 = 22,4 \text{ дм}^3/\text{моль}$;

$P_0, P = 101325 \text{ Па}$.

Якщо одна мільйонна об'ємна частка складає (1/1000) %, справедливим є вираз:

$$1 \text{ ppm} (1 \text{ млн}^{-1}) = 0,0001 \% = 0,000 001 = 10^{-6}, \quad (3.6)$$

тоді: $1 \% = 10 000 \text{ ppm}$.

Приклад 1. Обчисліть концентрацію аміаку в повітрі, що відповідає значенню максимально разовий ГДК, в одиниці міру – ppm за тиску – 101325 Па та температури – 293 К.

Розв'язання:

Розрахунок концентрації аміаку в одиницях ppm можна подати наступними обчислюваннями згідно формули 3.4:

$((0,2/1000)/17) \times 24,04 = 0,000283 \text{ дм}^3/\text{м}^3 = 0,000000283 \text{ м}^3/\text{м}^3$, що у відсотках буде становити: $0,000000283 \cdot 100 = 0,0000283\% \text{ об} = 0,283 \text{ ppm}$.

Або: значення $0,000283 \text{ дм}^3/\text{м}^3$ відповідає кількості дм^3 в м^3 . Тобто, для того, щоб значення перевести у відсотковий формат, треба $0,000283 \text{ дм}^3/\text{м}^3$ розділити на 10:

$0,000283 : 10 = 0,0000283 \% \text{ об}$. Тоді $0,0000283\% \text{ об} \cdot 10\,000 = 0,283 \text{ ppm}$.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІНОЇ РОБОТИ

1. Обчисліть допустиму об'ємну частку (% (об), ppm) нітроген(II) оксиду для максимально разових та середньодобових викидів (таблиця 2.2).
2. Обчисліть допустиму об'ємну частку (% (об), ppm) нітроген(IV) оксиду для максимально разових та середньодобових викидів (таблиця 2.2).
3. При спалюванні 1 кг вугілля в атмосферу викидаються токсичні оксиди Нітрогену (масою у перерахунку на NO_2 – 4,04 г при спалюванні 1 кг вугілля). Обчисліть об'єм повітря, що буде забруднений вище норми $\text{ГДК}_{\text{м.р.}}$ та $\text{ГДК}_{\text{с.д.}}$, якщо «Хогвартс Експрес» подолав відстань 1600 км за 10 годин. Витрата вугілля: 28 кг вугілля на 1 км $\text{ГДК}_{\text{с.д.}}(\text{NO}_2) = 0,04 \text{ мг}/\text{м}^3$; $\text{ГДК}_{\text{м.р.}}(\text{NO}_2) = 0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$. Клас небезпеки – 3.
4. Максимально допустимий вміст аміаку у повітрі виробничих приміщень $0,02 \text{ мг}/\text{дм}^3$. Обчисліть, чи відповідає нормам вміст аміаку в повітрі приміщень виробництва амонійної селітри площею 4800 м^2 і висотою 4,2 м, якщо відомо що під час виробництва партії товарної амонійної селітри в атмосферу потрапило $424,7 \text{ м}^3$ (н.у.) аміаку. Обчисліть значення концентрації аміаку у одиницях виміру – ppm.

4 РОЗРАХУНКИ МАСОВОГО, МОЛЯРНОГО ТА ОБ'ЄМНОГО СКЛАДУ СУМІШЕЙ

4.1 Розрахунок масового і молярного складу сумішей

Масова частка компоненту А виразити як m_A , а загальну масу суміші – m , то масова частка компоненту А у суміші розраховується згідно формули (4.1):

$$\omega_A = \frac{m_A}{m}. \quad (4.1)$$

До того ж, якщо у суміші присутні компоненти А, В, С, то сума їх масових часток не може бути більше одиниці.

Склад суміші можна розрахувати в молярних частках за формулою:

$$\chi_A = \frac{n_A}{n}. \quad (4.2)$$

Перерахунок масового складу суміші в молярний здійснюється наступним чином. Якщо масовий склад виражається як $\omega_A, \omega_B, \omega_C$, а молярні маси компонентів позначити як M_A, M_B, M_C , і враховуючи те, що за умови $m = 1$, з виразу $\omega_A = \frac{m_A}{m}$ витікає рівність $\omega_A = m_A$, в одиниці маси суміші ($m = 1$ кг) міститься наступна кількість моль компоненту:

$$n_A = \frac{\omega_A}{M_A}, \text{ моль}. \quad (4.3)$$

Підставляючи вираз (4.3) у формулу (4.2) отримуємо:

$$\chi_A = \frac{\frac{\omega_A}{M_A}}{\sum \frac{\omega}{M}}, \text{ де } \sum \frac{\omega}{M} = \frac{\omega_A}{M_A} + \frac{\omega_B}{M_B} + \frac{\omega_C}{M_C}. \quad (4.4)$$

У випадку, якщо заданий молярний склад суміші χ_A, χ_B, χ_C , то для перерахунку його у масовий склад необхідно знайти маси компонентів:

$$m_A = M_A \cdot \chi_A, \text{ тоді } m = \sum M \cdot \chi. \quad (4.5)$$

Підставляємо значення m в формулу (4.1):

$$\omega_A = \frac{M_A \cdot \chi_A}{\sum M \cdot \chi}. \quad (4.6)$$

Склад суміші двох компонентів можна представити через масову і молярну частку одного з компонентів. Нехай масова та молярна частки першого компоненту – ω, χ . Тоді масова та молярна частки другого компоненту можна знайти за різницями: $(1 - \omega), (1 - \chi)$.

Тоді формули (4.4 і 4.6) матимуть вигляд відповідно:

$$\chi = \frac{\frac{\omega}{M_1}}{\frac{\omega}{M_1} + \frac{1-\omega}{M_2}}, \quad (4.7)$$

$$\omega = \frac{M_1 \cdot \chi}{M_1 \cdot \chi + M_2 \cdot (1 - \chi)}. \quad (4.8)$$

4.2 Розрахунок об'ємної концентрації компонентів газової суміші

Об'ємна концентрація компоненту у газовій суміші має розмірність, моль/м³, кг/м³.

Під парціальним тиском розуміють внесок газу певного роду в загальний тиск суміші газів і відповідає тиску, під яким перебував би газ, що входить до складу газової суміші, коли б він один займав об'єм, рівний об'ємові суміші за тієї ж температури.

Згідно закону Дальтона загальний тиск газової суміші дорівнює сумі парціальних тисків компонентів:

$$P = p_A + p_B + p_C + \dots + p_i. \quad (4.9)$$

Наслідок закону Авогадро: однакові кількості молекул різних газів за однакової температури та однакового тиску займають однакові об'єми, а 1 моль будь-яких газів містить однакову кількість молекул – $6,02 \cdot 10^{23}$, це число називають сталою Авогадро.

Об'ємну частку газу в суміші можна представити (іноді в технологічних розрахунках зустрічається позначення об'ємної частки компоненту в газових сумішах літерою – « φ »):

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} = \frac{p_i}{P}, \quad (4.10)$$

де V , V_i – загальний об’єм суміші газів та об’єм, що займає i -тий компонент відповідно, м^3 ;

P , p_i – загальний тиск суміші газів та тиск, під яким перебуває i -тий компонент відповідно, бар.

Оскільки 1 моль будь-яких газів у суміші за рівної температури і тиску займають один і той же об’єм, то об’ємна частка φ_i дорівнює молярній частці компоненту χ_i .

$$\chi_i = \frac{p_i}{P}. \quad (4.11)$$

Рівнянням Клапейрона-Менделєєва виглядає наступним чином:

$$PV = \frac{m}{M} \cdot RT \quad (4.12)$$

де m – маса, г;

M – молярна маса, г/моль;

R – універсальна газова стала, що дорівнює 8,31 Дж/(моль·К);

P – тиск, Па, ($P_0 = 101325$ Па або 101,325 кПа);

V – об’єм, м^3 ;

T – температура, К, ($T_0 = 273$ К).

Для маси i -того компонента у суміші, що дорівнює 1 кг, рівняння виглядає:

$$p_i V = \frac{1}{M_i} \cdot RT. \quad (4.13)$$

Звідси загальний об’єм суміші:

$$V = \frac{R \cdot T}{M_i \cdot p_i}. \quad (4.14)$$

Оскільки масу i -того компоненту було задано – 1 кг, то молярна (об’ємна) концентрація дорівнює:

$$C_i = \frac{1}{V}, \text{ тобто } C_i = \frac{M_i \cdot p_i}{R \cdot T}. \quad (4.15)$$

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Розрахунок молярних, масових та об'ємних часток компонентів газових сумішей

Приклад 1. Обчисліть молярний склад і середню молярну масу суміші бензолу та толуолу, що містить $\omega(\text{C}_6\text{H}_6) = 30\%$.

Розв'язання:

Молярні маси бензолу та толуолу складають: $M(\text{C}_6\text{H}_6) = 78$ г/моль, $M(\text{C}_7\text{H}_8) = 92$ г/моль.

Використовуючи формулу (4.7) розраховуємо молярну частку бензолу у суміші:

$$\chi = \frac{\frac{0,3}{78}}{\frac{0,3}{78} + \frac{1-0,3}{92}} = 0,336,$$

де 0,3 – масова частка бензолу.

Тоді відповідно молярна частка толуолу визначається як різниця:

$$1 - \chi = 1 - 0,336 = 0,664.$$

Середня молярна маса суміші:

$$M_{\text{сер}} = 78 \cdot 0,336 + 92 \cdot 0,664 = 87,2 \text{ г/моль}.$$

Приклад 2. Обчисліть масові частки компонентів суміші: $\chi(\text{C}_2\text{H}_6) = 20\%$; $\chi(\text{C}_3\text{H}_8) = 35\%$; $\chi(\text{C}_4\text{H}_{10}) = 15\%$; $\chi(\text{C}_4\text{H}_{10}) = 30\%$.

Розв'язання:

Використовуючи формулу (4.8) розраховуємо масові частки і записуємо у таблицю:

Компоненти	Молярна маса, М, г/моль	Молярна частка, χ	$M \cdot \chi$	Масова частка, ω
Етан	30	0,20	6,0	0,26
Пропан	44	0,35	15,4	0,325
Бутан	58	0,15	8,7	0,183
Ізобутан	58	0,30	17,4	0,366
Усього		1,00	47,5	1,0

Приклад 3. Суміш карбон(IV) оксиду з повітрям містить: $\chi(\text{CO}_2) = 15\%$. Обчисліть вміст CO_2 у суміші в % (мас), парціальний тиск карбон(IV) оксиду у суміші та його об'ємну концентрацію за температури 25°C і абсолютному тиску $P = 19,6$ бар (20 атм).

Розв'язання:

Для газових сумішей об'ємна частка компоненту дорівнює його молярній частці (див. формули 4.10, 4.11), тобто $\chi_{\text{CO}_2} = 0,15$.

Масову частку CO_2 знаходимо за формулою 4.8:

$$\omega = \frac{44 \cdot 0,15}{44 \cdot 0,15 + 29 \cdot (1 - 0,15)} = 0,212 \text{ або } 21,2\%.$$

Парціальний тиск CO_2 знаходимо за формулою (4.11):

$$p_{\text{CO}_2} = 19,6 \cdot 0,15 = 2,94, \text{ бар (3 атм).}$$

Об'ємну концентрацію CO_2 знаходимо за формулою (4.15):

$$C_i = \frac{44 \cdot 2,94 \cdot 10^5}{8314 \cdot (273 + 25)} = 5,23 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 4. У суміші карбон(IV) оксиду і азоту масові частки компонентів однакові. Обчисліть об'ємні частки газів.

Розв'язання:

Припустимо у газовій суміші масою 100 г міститься 50 г CO_2 і 50 г N_2 .

Кількість речовини CO_2 дорівнює: $n(\text{CO}_2) = 50 \text{ г} / 44 \text{ г/моль} = 1,136 \text{ моль}$.

Кількість речовини N_2 дорівнює: $n(N_2) = 50 \text{ г} / 28 \text{ г/моль} = 1,786 \text{ моль}$.

Тоді молярна частка кожного з компонентів розраховується згідно формули (4.2): $\chi(CO_2) = 1,136 \text{ моль} / 2,922 \text{ моль} = 0,389$, а $\chi(N_2) = 1,786 \text{ моль} / 2,922 \text{ моль} = 0,611$, де 2,922 моль – сумарна кількість моль компонентів у газовій суміші.

Оскільки молярні частки за значенням співпадають з об'ємними для газів, записуємо об'ємні частки CO_2 і N_2 :

$$\varphi(CO_2) = 0,389 \text{ або } 38,9\%.$$

$$\varphi(N_2) = 0,611 \text{ або } 61,1\%.$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІНОЇ РОБОТИ

1. Обчисліть масовий склад суміші: $\chi(NO_2) = 15 \%$; $\chi(CO) = 13 \%$; $\chi(H_2) = 45 \%$; $\chi(\text{повітря}) = 27 \%$.
2. Обчисліть молярний склад і середню молярну масу суміші N_2O та CH_4 , що містить $\omega(CH_4) = 23 \%$.
3. Обчисліть масовий склад суміші: $\chi(H_2S) = (7+0,1N)\%$; $\chi(\text{повітря}) = (62+0,1N)\%$; $\chi(N_2O_3) = (24+0,1N)\%$; $\chi(NO_2) = (7+0,1N)\%^*$.
4. Обчисліть молярний склад і середню молярну масу суміші ізобутану та N_2O що містить $\omega(N_2O) = 39 \%$.
5. Суміш складається з карбон(IV) оксиду, азоту та аргону. Об'ємні частки газів становлять: $\varphi(CO_2) = 20 \%$, $\varphi(N_2) = 50 \%$ та $\varphi(Ar) = 30 \%$. Обчисліть масові частки ($\omega\%$) газів в суміші.
6. Газова суміш містить: $\varphi(N_2) = 30 \%$, $\varphi(H_2) = 10 \%$ та $\varphi(NH_3) = 60 \%$. Обчисліть середню відносну молярну масу газової суміші.

*N – номер варіанту студента за списком групи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Разва А. С., Конспект лекцій: «Природоохранные технологии в промышленной теплоэнергетике», Томськ, 2010, 2010, 27 с.
Режим доступу: <https://portal.tpu.ru/SHARED/r/RAZVA/study/prip/prir/m5.pdf>
2. Мищенко А. В., Кузнецов С. И. Термический метод нейтрализации оксидов азота, Вісник ХНТУ, 2018, № 2(65), С. 35-41.
3. Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г. Технічні засоби очищення газових викидів: Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 158 с.
Режим доступу: <http://tgp.vntu.edu.ua/doc/000295.pdf>
4. <https://studfile.net/preview/2525323/page:17/>
5. Олійник М.А., Конспект лекцій з дисципліни «Технології очистки та утилізації промислових стоків та викидів» для студентів напряму підготовки 6.051301 - «Хімічна технологія», 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» та 6.051401 – «Промислова біотехнологія» (Частина 1), . – Кам'янське: ДДТУ, 2016. 56 стор.
6. Носков А. С., Пай З. П. «Технологические методы защиты атмосферы от вредных выбросов на предприятиях энергетики», Новосибірськ, 1996. – 156 с
Режим доступу: http://www.spsl.nsc.ru/download/ecology/V_40.pdf
7. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0157-95#Text>
8. Михайлова Є. О. Можливі способи очищення газових викидів від оксидів нітрогену в умовах виробництва кальцинованої соди / Є. О. Михайлова // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : XV міжнар. наук.-практ. конф., 9-13 вер. 2019 р. : зб. наук. ст. – Х. : ПП «Стиль-Іздат», 2019. – С. 227-231.
9. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0201282-97#Text>

**ПРИКЛАДИ ХІМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В
ТЕХНОЛОГІЧНО-ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕННЯХ ЩОДО
ВПРОВАДЖЕННЯ ЗНЕШКОДЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ NO_x**

АБСОРБЦІЙНІ СПОСОБИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

Абсорбційні процеси супроводжуються масообміном між абсорбентом (поглиначем) і абсорбатом (речовини, що поглинаються). Визначальним фактором, що впливає на ефективність процесу є поверхня контакту між абсорбентом і абсорбатом. Чим більша площа контакту фаз, тим більша швидкість переносу цільового компонента абсорбату в рідку фазу абсорбенту.

Таким чином, інтенсифікація абсорбційних технологій втілюється шляхом удосконалення конструкцій абсорберів, створюється високо розвинута поверхня контакту фаз. Абсорбери за принципом дії поділяються на:

- 1) поверхневі – абсорбат і абсорбент контактують на поверхні плівки рідини, які стікає по каналам (плівкові), по елементам насадки (насадкові);
- 2) барботажні – абсорбат і абсорбент контактують на поверхні пухирців і струменів, які виникають при пропусканні газу через шар рідини на тарілці;
- 3) розпилювальні (газопромивачі) – абсорбат і абсорбент контактують на поверхні краплин рідини, що розпилюється усередині порожнистого апарату.

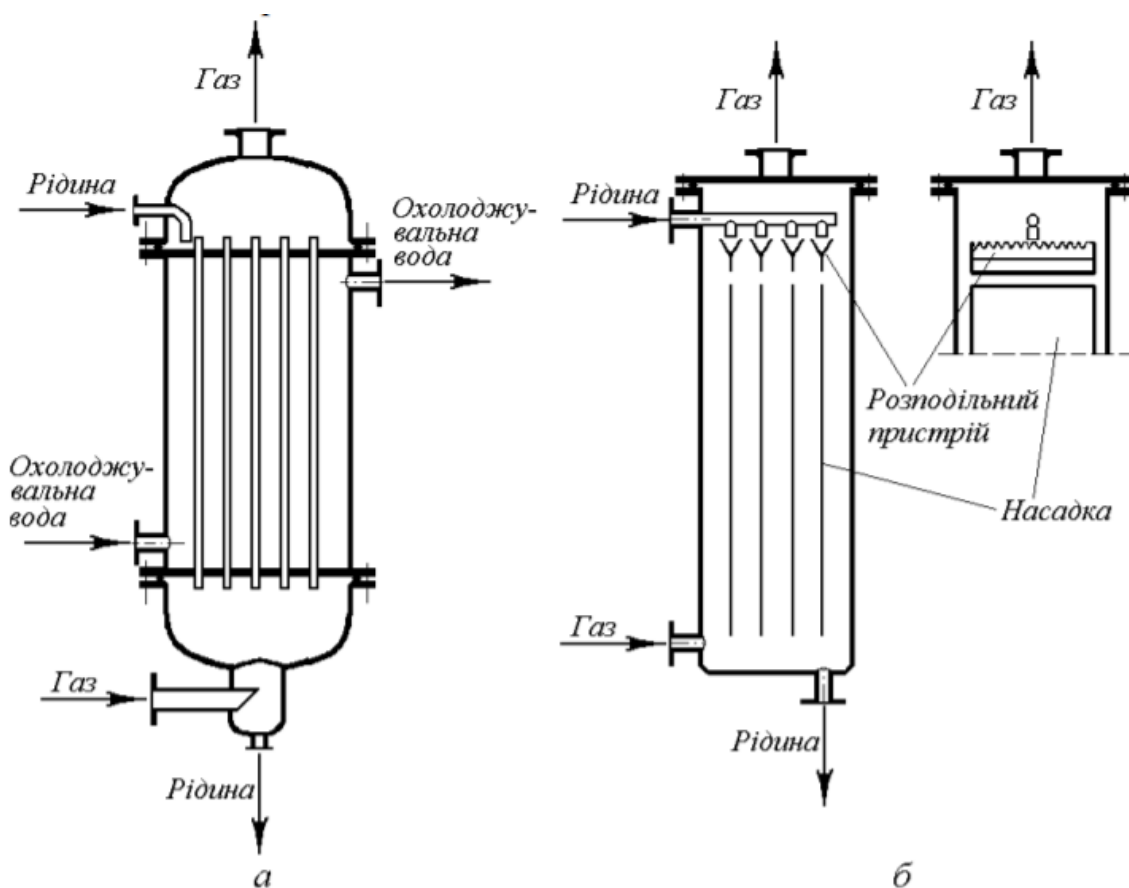
ПОВЕРХНЕВІ АБСОРБЕРИ

Плівкові абсорбери

Плівкові абсорбери можуть бути трубчастими (рис.А1,а), в яких поглинач надходить зверху колони і стікає по внутрішній поверхні труб, розташованих вертикально, утворюючи тонку плівку. Газова суміш рухається

вгору по трубкам, а у міжтрубному просторі рухається охолоджувальний агент.

Використовуються також абсорбери з листовою насадкою (рис. А1,б), які мають насадку у вигляді вертикально закріплених листів з твердого матеріалу (з металу, дерева, полімерних матеріалів, тканини тощо). Зверху насадка зрошується поглиначем, що утворює плівку рідини з обох боків насадки, а назустріч рухається газ.



а) – трубчастий; б) – з листовою насадкою.

Рисунок А1 – Плівкові абсорбери [3, 5, 6].

Насадкові абсорбери

Насадкові адсорбери заповнені насадкою різної конструкції – твердими тілами різної форми, що вироблені зі матеріалу, який добре змочується.

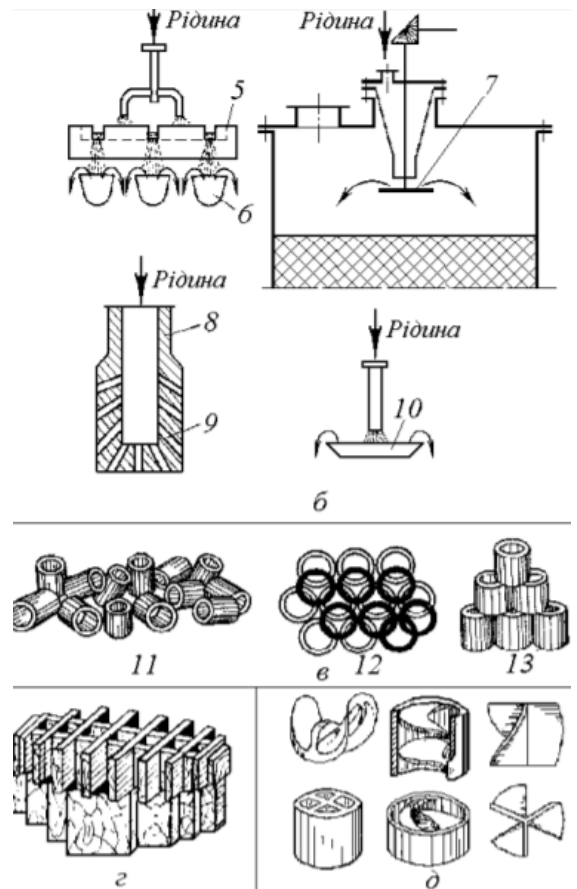
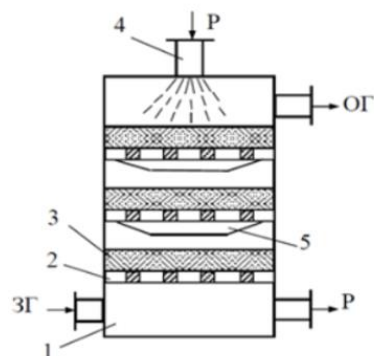


Рисунок А2 – Схема насадкового абсорбера [3, 5, 6].

50

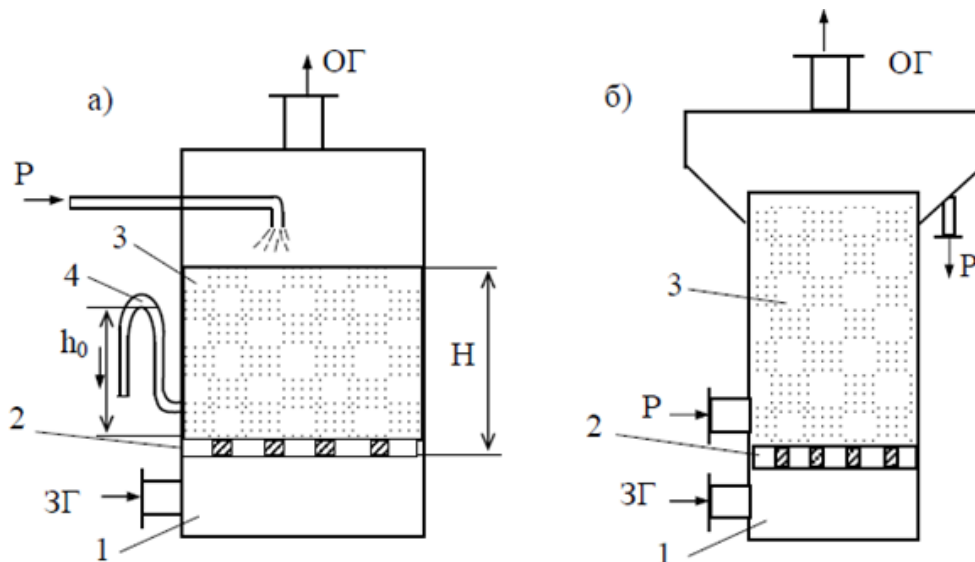
(кокс, кварц тощо), якою заповнений весь об'єм колони. Широковживаного практичного використання набуло кільцевих насадок (рис. А2, в), які мають різні назви – кільця Рашига, хордові насадки (рис. А2, з) та фасонні насадки (рис. А2, д). Розподіл поглинаючої рідини в насадковому абсорбері (рис. А2) здійснюється за допомогою розбризкуючих зрошувачів (гірляндові та щілинні зрошувачі, перфоровані стакани, розбризкуючі зірки).

БАРБОТАЖНІ АБСОРБЕРИ

Барботажні абсорбери поділяються на абсорбери з суцільним шаром рідини та тарілчастого/поличного типу.

Абсорбери з суцільним шаром рідини

Принцип дії барботерів полягає у проходженні (барботажі) бульбашок газу скрізь шар поглинаючої рідини, при цьому масообмін процесу обмежений загальною площею поверхні диспергованого газу або піни, що утворюється при барботажі.



а) протиструмний; б) прямострумний;

1 – корпус; 2 – опорна решітка; 3 – суцільний барботажний шар;

4 – гідрозатвор.

Рисунок А3 – Схема абсорбера з суцільним барботажним шаром [3, 5, 6].

Абсорбери з суцільним барботажним шаром висотою H (рис. А3) мають невелику швидкість руху газу (від 0,3 м/с до 0,4 м/с) і малу інтенсивність масопередачі. Висота h_0 – простір рідини без піни.

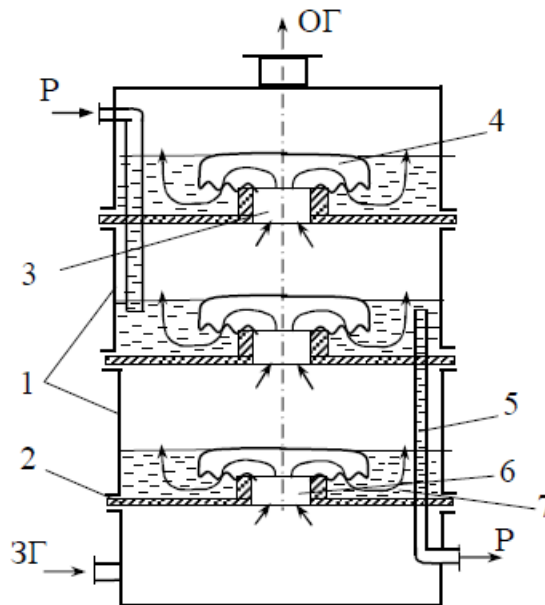
Абсорбери тарілчастого/поличного типу

Для збільшення ступеню очищення газів використовують абсорбери тарілчастого/поличного типу (надалі – тарілчастого типу), в яких по всій висоті апарата розташовують тарілки (полиці), скрізь які проходить газовий потік. У залежності від конструкції тарілок розділяють ковпачкові, сітчасті та клапанні тарілки абсорбційної колони.

При використанні пінного режиму швидкість руху газу складає від 0,5 до 3 м/с, газ утворює при цьому велику кількість дрібних бульбашок та струменів, що приводить до появи суцільного шару піни. Утворення піни викликає збільшення поверхні контакту фаз і підвищує ефективність поглинання газу.

При струминному режимі роботи тарілчастого абсорбера швидкість руху газу збільшується до 5 м/с, що приводить збільшення розмірів бульбашок і струменів і, як наслідок, утворення великої кількості крапель та плівок на поверхні тарілки. Поверхня масообміну і ефективність абсорбції при цьому зростає.

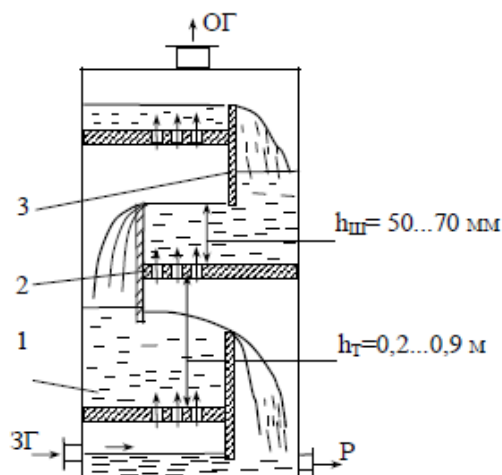
При роботі ковпачкової тарілки газ (рис. А4), проходить через центральний отвір, потрапляє в прорізи круглого ковпака, далі барботує скрізь шар рідини і створює піну. Вода/розчин спускається по переливних трубах і виводиться на регенерацію або зливання до каналізації, в залежності від технологічного регламенту.



1 – корпус; 2 – горизонтальні опорні решітки; 3 – патрубок; 4 – круглий ковпак; 5 – переливна труба; 6 – центральний отвір; 7 – шар піни.

Рисунок А4 – Схема абсорбера з ковпачковою барботажною тарілкою [3, 5, 6].

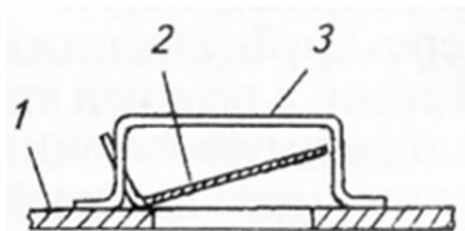
Сітчасті тарілки (рис. А5) з переливними пристроями, які облаштовані порогами для руйнування піни та підтримання необхідного шару рідини на тарілці. Вода переливається з верхніх тарілок на нижні через переливні пороги, а газ рухається на зустріч – знизу догори.



1 – корпус; 2, 3 – пороги (горизонтальні та вертикальні перетинки).

Рисунок А5 – Схема абсорбера з сітчастими барботажними тарілками [3, 5, 6].

Принцип барботажу газу через рідину при використанні клапанної тарілки схожий на принцип роботи ковпачкової тарілки. Проходження газу через товщу рідини відбувається через клапан (рис. А6), який забезпечує стабільну роботу колони.

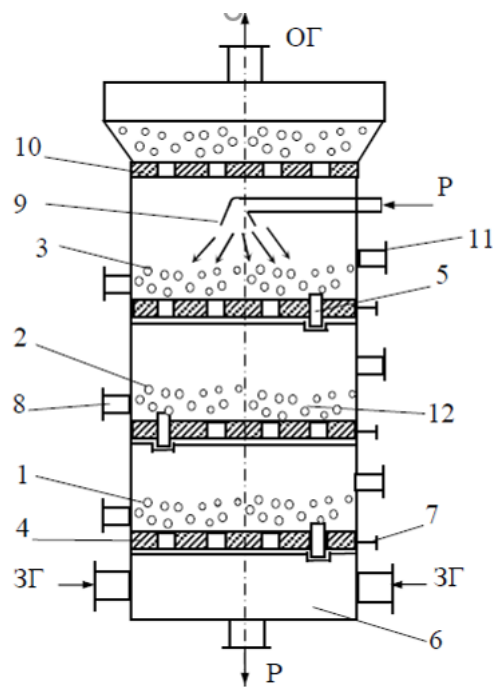


1 – тарілка; 2 – клапан; 3 – обмежувач.

Рисунок А6 – Схема клапана [3, 5, 6].

У разі наявності у газовій суміші твердих частинок використовують рухому/плаваючу насадку: порожнисті кулі, куби, піраміди, диски, кільця тощо. У тарілчастих абсорберах на решітках розташована насадка, яка рухається завдяки руху газу (рис. А7).

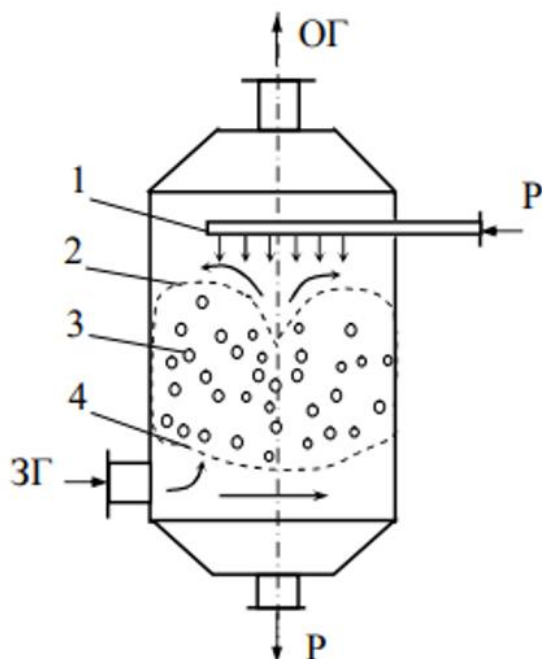
Зверху знаходиться сепараційна камера, що за рахунок збільшення діаметру попереджає винос насадки через верхній патрубок. Значний гідравлічний опір не заважає доволі високій швидкості газового потоку, а саме від 2 м/с до 5 м/с.



1, 2, 3 – робочі секції; 4 – перфорована опорна решітка; 5 – перетічний патрубок; 6 – газорозподільча камера; 7 – регулятор частки вільного перерізу решітки; 8 – патрубок для вивантаження насадки; 9 – форсунка для подачі води; 10 – сепараційна камера; 11 – патрубок для завантаження насадки; 12 – насадка.

Рисунок А7 – Схема багатополічного абсорбера з рухомою насадкою [3, 5, 6].

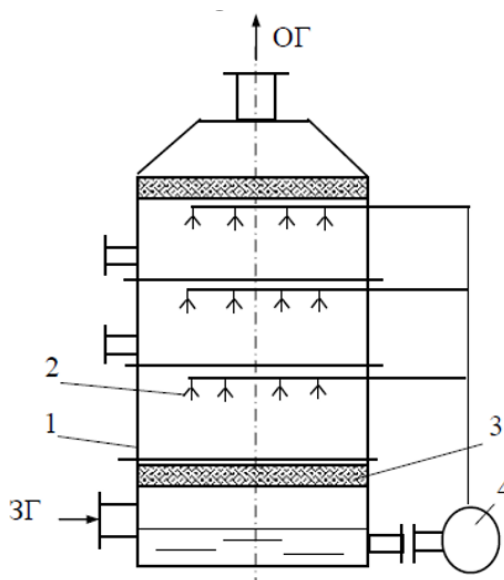
Згадуючи абсорбери з рухомою насадкою (рис. А8), слід згадати й абсорбери з суцільним шаром рухомої насадки, які не належать до тарілчастих абсорберів у класичному сенсі, але ефективно використовуються в технологіях.



1 – зрошувальний колектор; 2 – перфорована опорна решітка фігурної форми;
3 – кулькова насадка; 6 – газорозподільча решітка для задування повітря з тангенціальними отворами.

Рисунок А8 – Схема абсорбера з рухомою насадкою у суцільному шарі [3, 5, 6].

Розпилювальні тарілчасті абсорбери є конструкційно простими і можуть працювати в широкому діапазоні витрати газу та рідини (рис. А9). Принцип роботи таких абсорберів полягає у розбризкуванні поглинача в потоці газу, внаслідок чого гідравлічний опір має низьке значення. Недоліком розпилювального методу є невисока ефективність сорбції газу.



1 – корпус; 2 – форсунка; 3 – розподільчий екран; 4 – насос.

Рисунок А9 – Схема розбризкуючого/розпилювального форсункового абсорбера [3, 5, 6].

АДСОРБЦІЙНІ СПОСОБИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

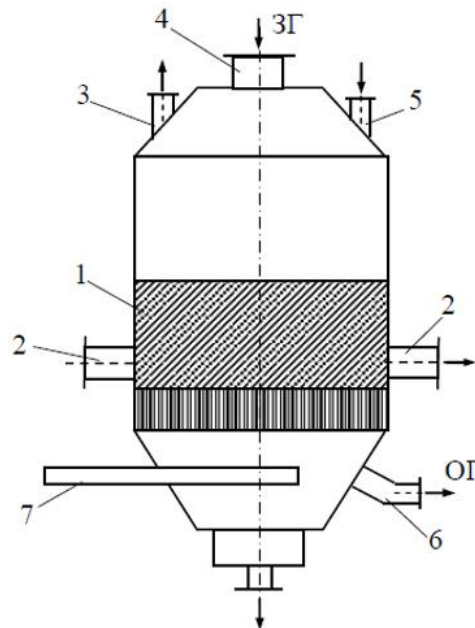
У основу класифікації адсорбційних апаратів покладено властивості адсорбентів, а саме їх механічна і хімічна стійкість, параметри регенерації селективність тощо. Адсорбери поділяються на апарати періодичної та безперервної дії.

Адсорбери з нерухомим шаром адсорбенту після досягнення насичення піддається регенерації, при цьому робочий цикл апарату може включати низку стадій: нагрівання, охолодження, обробка реагентами тощо. Такі адсорбери належать до апаратів періодичної дії, у яких використовують також і киплячий шар адсорбенту.

Принцип роботи адсорберів безперервної дії полягає в постійному русі адсорбенту, який після насичення виводиться з апарату, а «свіжі» порції адсорбенту – вводяться в адсорбер. У такому випадку не виникає потреби зупиняти роботу апарату.

Адсорбери періодичної дії

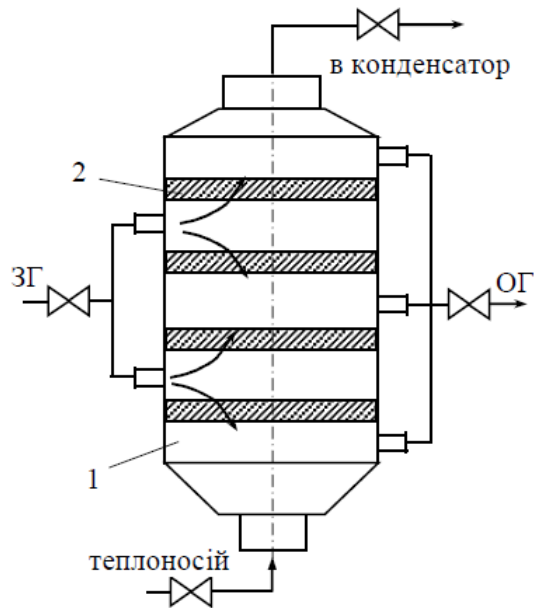
Адсорбер з нерухомим фільтрувальним шаром адсорберу наведено на рисунку А10.



1 – корпус; 2 – люки для вивантаження адсорбенту; 3 – штуцер для відведення парів при десорбції; 4 – патрубок для відведенні паро-газової суміші під час десорбції та повітря під час сушіння і охолодження адсорбенту при регенерації; 5 – люк для завантаження адсорбенту; 6 – патрубок для відведення очищеного газу; 7 – патрубок для відведення конденсату.

Рисунок А10 – Схема адсорбера періодичної дії з фільтрувальним шаром адсорбенту [3, 5, 6].

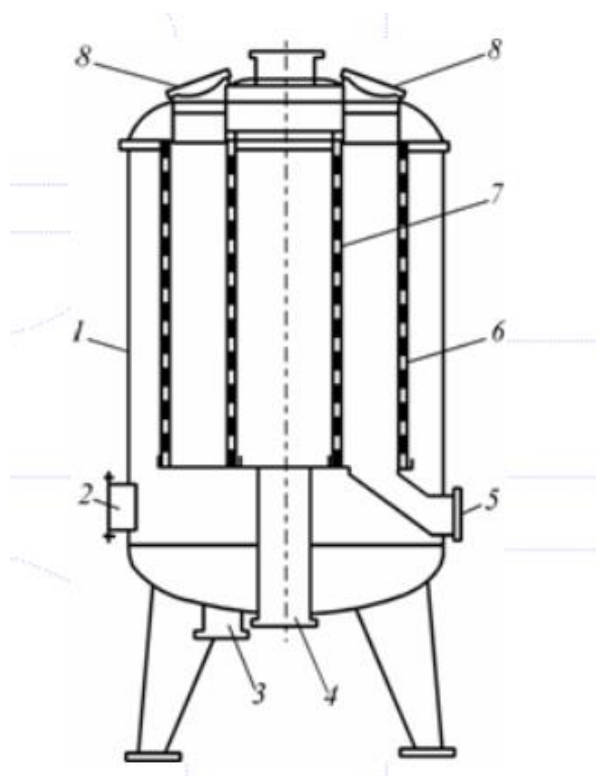
Для інтенсифікації процесу адсорбції використовують конструкції багатополічних адсорберів, у яких забруднений газ поступово проходить скрізь декілька шарів адсорбенту, за рахунок чого збільшується його ступінь очищення (рис. А11).



1– корпус; 2 – шари адсорбенту.

Рисунок А11 – Схема багатополичного адсорбера періодичної дії [3, 5, 6].

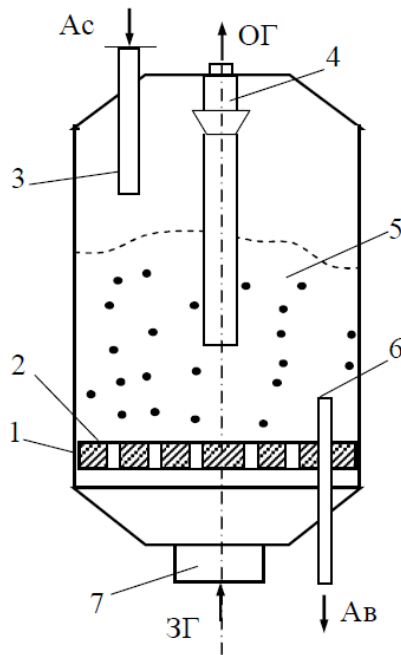
У кільцевому адсорбері періодичної дії (рис. А12) газ забруднений газ вводиться через штуцер 2 і потрапляє у зовнішню частину корпусу, проходить у горизонтальному напрямку скрізь кільцевий шар адсорбенту, що знаходиться між решітками 6 і 7, і відводиться через штуцер 4. Під час регенерації на стадії десорбції водяна пара подається через штуцер 4, а паро-газова суміш відводиться через штуцер 3.



1 – корпус циліндричного перерізу; 2 – штуцер подачі газу; 3 – штуцер для відведення парів десорбції; 4 – штуцер для відведення газу та подачі пари; 5 – люк вивантаження сорбенту; 6, 7 – решітки; 8 – люки завантаження адсорбенту.

Рисунок А12– Схема кільцевого адсорбера періодичної дії [3, 5, 6].

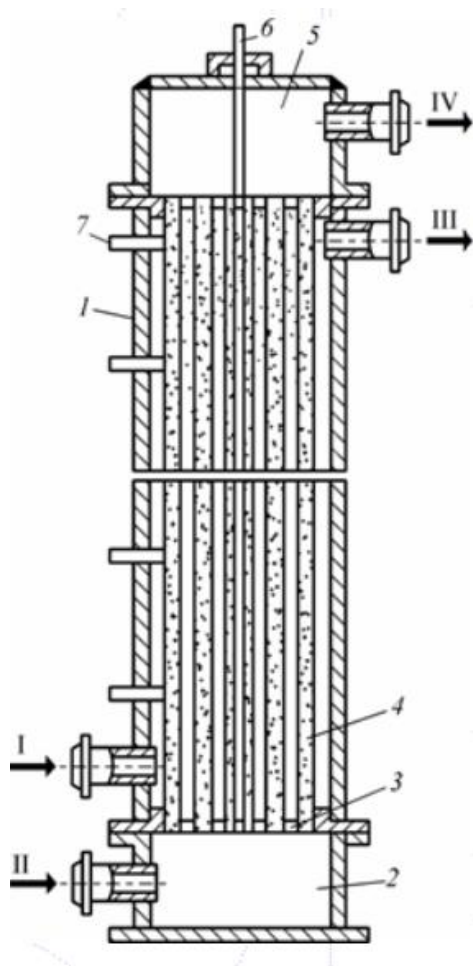
Для збільшення площі контакту адсорбенту і забрудненого газу, з метою зменшення гідравлічного опору шару адсорбенту і підвищення ефективності процесу адсорбції використовують конструкції адсорберів з киплячим/віброкиплячим шаром адсорбенту (рис. А13).



1 – корпус циліндричного перерізу з конусом внизу; 2 – розподільча решітка; 3 – штуцер для введення адсорбенту; 4 – циклон; 5 – адсорбент; 6 штуцер для виведення адсорбенту; 7 – подача забрудненої газової суміші.

Рисунок А13 – Схема адсорбера періодичної дії з киплячим шаром адсорбенту [3, 5, 6].

У випадках, коли необхідно регулювати температурний режим процесу адсорбції використовують конструкції адсорберів з вбудованими елементами теплообмінників, найчастіше з яких застосовують вертикальні теплообмінники (рис. А14). У таких конструкціях адсорбент завантажений у труби, а гріючий або охолоджуючий агент рухається у міжтрубному просторі.



1 – корпус; 2, 5 – камери; 3 – газорозподільча решітка; 4 – труби; 6 – карман для термопар; 7 – штуцер для відбору проби газу і вимірювання температури; потоки: I, III – теплоносій; II, IV – газ.

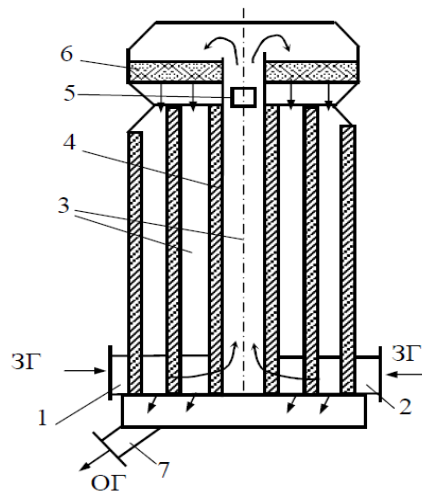
Рисунок А14 – Адсорбер періодичної дії з вертикальним теплообмінником [3, 5, 6].

Адсорбери безперервної дії

На рисунках А15 і А16 наведено типові конструкції адсорберів безперервної дії, у яких адсорбент рухається на горизонтальному стрічковому транспортері або вібрувальних пристроях.

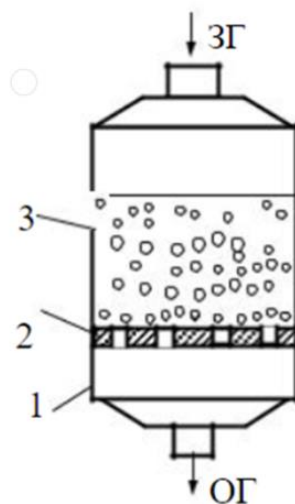
Каталітичні реактори з фільтрувальним шаром каталізатора

Принцип дії полягає на фільтруванні рідини або газу через нерухомий шар каталізатору (рис. А17 – А21).



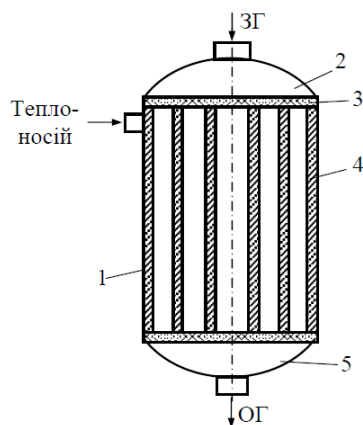
1, 2 – подача забрудненого газу; 3 – міжтрубний простір; 4 – рекуператор теплоти; 5 – форсунки; 6 – шар каталізатора; 7 – виведення очищеного газу.

Рисунок А17 – Каталітичний реактор каталітичного очищення газів з фільтрувальним шаром каталізатора [3, 5, 6].



1 – корпус; 2 – перфорована решітка; 3 – каталізатор у вигляді твердих тіл різної форми.

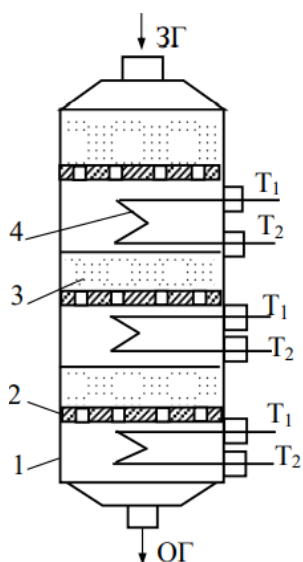
Рисунок А18 – Каталітичний реактор з насадкою у вигляді твердих тіл на перфорованих решітках [3, 5, 6].



1 – корпус; 2 – кришка; 3 – решітка; 4 – система труб з нанесеним каталізатором; 5 – днище.

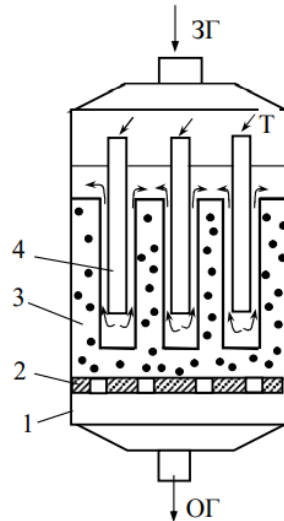
Рисунок А19 – Трубчастий реактор каталітичного очищення газів з нанесеним каталізатором [3, 5, 6].

З метою прискорення процесу контакту реагентів з каталізатором в апараті розташовують декілька шарів каталізатору або встановлюють трубки заповнені каталізатором між якими знаходиться теплоносій або холодоагент.



1 – корпус; 2 – перфорована решітка; 3 – каталізатор; 4 – теплообмінники.

Рисунок А20 – Каталітичний реактор з фільтрувальним шаром та з кількома шарами каталізатору [3, 5, 6].

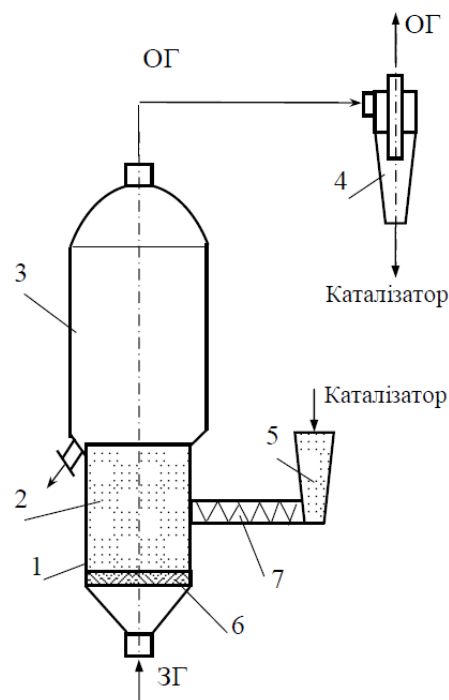


1 – корпус; 2 – перфорована решітка; 3 – каталізатор в трубках;
4 – теплообмінники.

Рисунок А21 – Каталітичний трубчастий реактор з фільтрувальним шаром [3, 5, 6].

Каталітичні реактори з киплячим шаром каталізатору

У шарі киплячого каталізатору (рис. А22, А23) кожна гранула каталізатору інтенсивно з усіх боків омивається газом ($u=k \cdot \Delta C \cdot F$), що зумовлює високий коефіцієнт масо- та теплопередачі, не викликаючи локального перегріву суміші. Принцип киплячого шару дозволяє механізувати та автоматизувати процес завантаження та вивантаження каталізатору та підтримувати постійну висоту шару.



1 – корпус; 2 – дрібнодисперсні (d : від 0,5 до 1,5 мм) зерна каталізатору;
 3 – верхня частина реактору більшого діаметру для зменшення виносу каталізатору; 4 – циклон для очищення газового потоку від каталізаторного пилу; 5 – бункер завантаження каталізатору; 6 – перфорована решітка;
 7 – шнек подачі каталізатору у реакційну зону.

Рисунок А22 – Каталітичний реактор з киплячим шаром каталізатору [3, 5, 6].

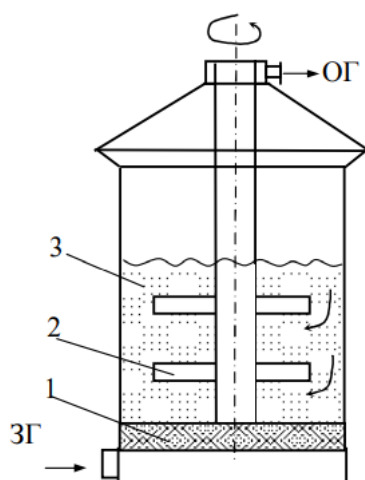
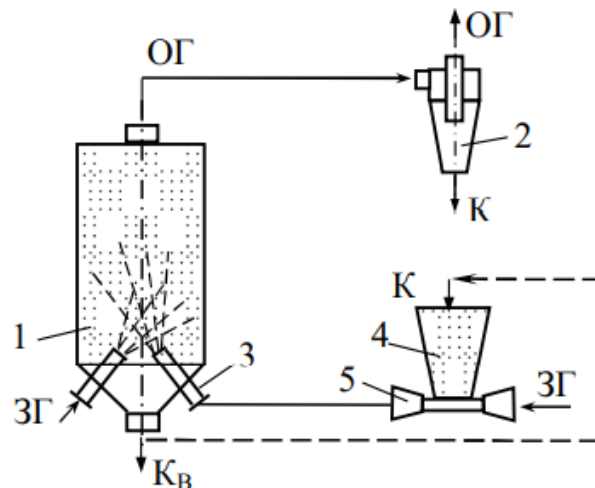


Рисунок А23 – Каталітичний реактор з киплячим шаром каталізатору та мішалкою [3, 5, 6].

1 – перфорована решітка; 2 – мішалка; 3 – шар каталізатору.

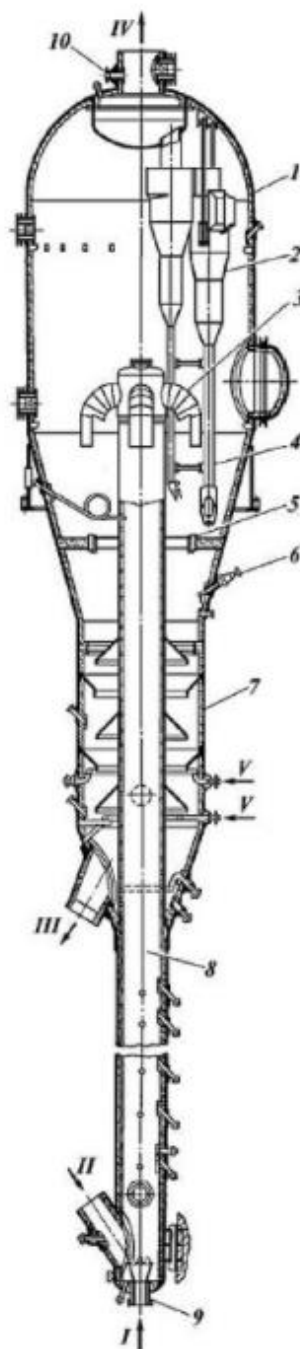
Каталітичні реактори з пилоподібним каталізатором

Вприскування за допомогою сопла каталізатора у вигляді пилу (рис. А24, А25) в реакційну зону дозволяє більш повно використовувати корисний об'єм апарату. Забруднена речовина розділена на 2 потоки: один входить в реактор, а другий – через ежекторний пристрій, де перемішується з каталізатором і на швидкості спрямовується в реактор. Реакція відбувається безпосередньо у завислому стані.



1 – корпус; 2 – циклон для очищення газового потоку від каталізаторного пилу; 3 – сопло; 4 – бункер; 5 – ежектор.

Рисунок А24 – Каталітичний реактор з пилоподібним каталізатором [3, 5, 6].



1 – корпус; 2 – двоступеневі циклони для очищення газового потоку від каталізаторного пилу; 3 – сепаратор; 4 – підтримувачі циклонів; 5 – опора;
 6 – форсунка для шламу; 7 – десорбер; 8 – ліфт-реактор; 9 – сопло;
 10 – запобіжний клапан; потоки: I – сировина; II – каталізатор після регенерації; III - каталізатор на регенерацію (закоксований);
 IV – продукти крекінгу; V – водяна пара.

Рисунок А25 – Каталітичний реактор з пилеподібним каталізатором [3, 5, 6].

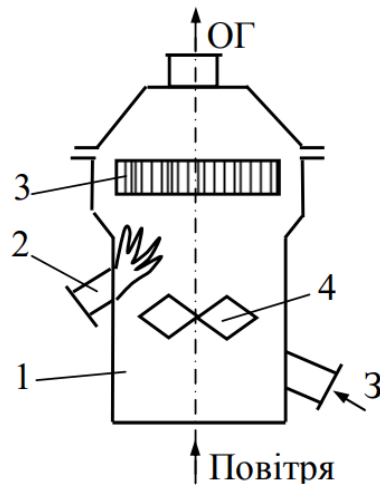
Каталітичний реактор з пилеподібним каталізатором для крекінгу вакуумного дистиляту використовується для переробки високомолекулярної нафтової сировини в: сухий газ, пропан-пропіленову фракцію, бутан-бутиленову фракцію, бензинову фракцію, тощо.

Каталізатор після регенерації за температури від 650 °С до 700 °С потрапляє у нижню частину ліфт реактора, де вступає в контакт з краплинами сировини (вакуумного дистиляту). Краплини дистиляту формуються під час проходження через сопло 9. Після передачі тепла від гарячого каталізатора в теплообміннику температура каталізатору знижується до 500 °С, а тепло, що передалось витрачається на нагрів та випаровування дистиляту. Цей процес слугує початком каталітичного крекінгу з відкладанням на поверхні каталізатору частинок коксу.

Паро-газова суміш разом з каталізатором транспортується вгору (співвідношення довжини ліфт-реактору до його діаметру зазвичай складає приблизно як 20–25 до 1). Для швидкого відокремлення каталізатора від нафтопродуктів у верхній частині ліфт-реактора знаходиться сепаратор 3, після якого каталізатор потрапляє в десорбер 7, де піддається обробці паром. Десорбер розділений на секції з перфорованими конусами. У верхній частині реактора знаходяться форсунки для введення шламу (каталізатор, що був винесений з реактору), а у нижній – колектори для введення пари. Задля зменшення частини винесеного з реактору шламу у верхній частині реактора встановлюються циклони.

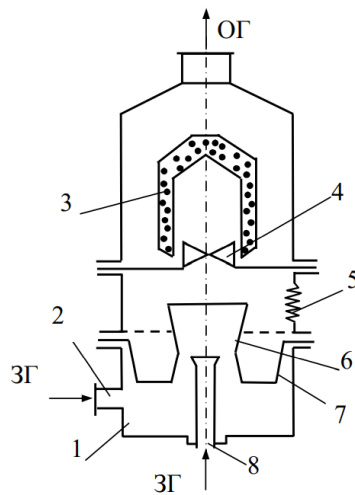
Термокаталітичні реактори

У термокаталітичних реакторах (рис. А26 – А29) в одному корпусі знаходиться контактний вузол, підігрівач, рекуператор тепла (в залежності від конструкції), що дозволяє суттєво зменшувати габарити апарата.



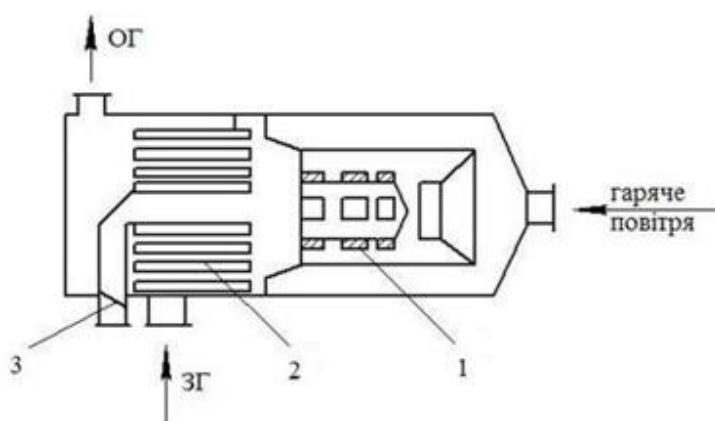
1 – корпус; 2 – пальник газу; 3 – каталізатор; 4 - змішувач газу.

Рисунок А26 – Термокаталітичний реактор [3, 5, 6].



1 – корпус; 2 – потік забрудненого газу; 3 – каталізатор; 4 - змішувач газу; 5 – вибухова мембрана; 6 – пальник; 7 – відбивач; 8 – другий потік забрудненого газу і суміші з паливним газом.

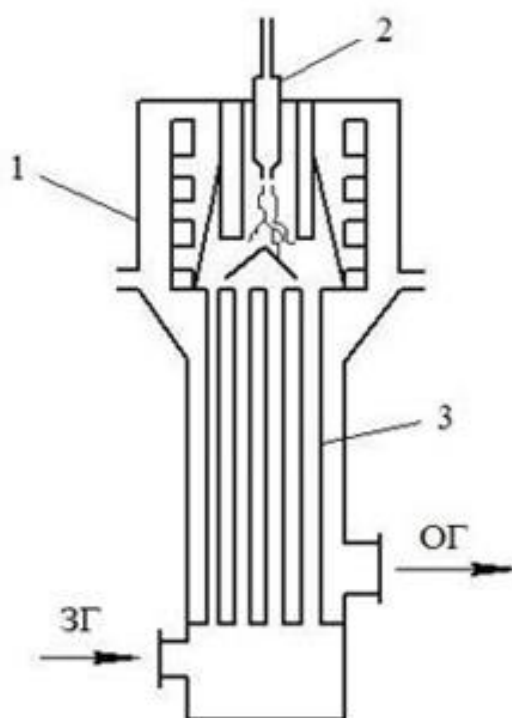
Рисунок А27 – Термокаталітичний реактор з двома потоками забрудненого газу [3, 5, 6].



1 – контактний вузол; 2 – рекуператор теплоти; 3 – запобіжний пристрій.

Рисунок А28 – Термокаталітичний реактор [3, 5, 6].

Газ, що очищується потрапляє в міжтрубний простір 2 і підігрівається там до температури початку реакції. Потім газ надходить до каталізатору 1, де відбувається основна реакція. Після цього очищений газ повертається і проходить патру-бками рекуператора, віддає теплоту і викидається в атмосферу



1 – касети з каталізатором; 2 – пальник газу; 3 – рекуператор теплоти.

Рисунок А29 – Термокаталітичний реактор [3, 5, 6].

Забруднені гази надходять у труби рекуператора теплоти 3, підігріваються за допомогою пальника 2, змішуючись з газами, утвореними при спалюванні палива, потім потрапляють на каталізатор 1, де відбувається реакція. Очищений газ проходить у міжтрубний простір рекуператора, віддає теплоту і викидається в атмосферу.