

**ANALYSIS OF THE GREENHOUSE GAS EMISSIONS
PROBLEM AND THE METHODS OF THEIR DISPOSAL**

**АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ
ТА МЕТОДІВ ЇХ ЗНЕШКОДЖЕННЯ**

Evgeniia Mykhailova¹

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-297-5-21>

Abstract. Global climate change is the most important environmental current problem. Its reason is the increase of greenhouse gas concentration in the atmosphere as a result of human activity. The climate change problem affects many aspects of the environment and society's existence, therefore, the development of tools and methods for reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere is an actual task today. *The purpose* of the paper is a comprehensive analysis of the greenhouse gas emissions problem state in Ukraine and the world, and to determine the main ways to solve this problem. The scientific and research paper tasks are: to provide a general greenhouse gas characteristic, determine the main consequences of climate change for Ukraine, analyze Ukraine's international steps to solve the problem of global climate change, establish the structure of greenhouse gas emissions in Ukraine, analyze existing and propose optimal chemical and technological methods for greenhouse gases neutralizing. *The methodology* of the study is based on a monographic type of research using general research methods of analysis, synthesis, induction, deduction and historical detailing. *The results.* The article provides a general greenhouse gas characteristic, the main sources of their emissions and their consequences for humans and the environment. The steps taken by the world society and Ukraine, in particular, to solve the global climate change problem are analyzed. The problem is solved by concluding international agreements to stabilize the greenhouse gas concentration in the atmosphere at a level that does not have a dangerous anthropogenic impact on the climate of Earth.

¹ Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Healthy Lifestyle and Life Safety,
Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Ukraine

It was determined that the main sources of greenhouse gas emissions in Ukraine are the enterprises of the fuel and energy complex, and enterprises of the processing and mining industry. An analysis of chemical-technological cleaning methods for greenhouse gas is presented. *Practical implications.* The analytical review makes it possible to choose the optimal method of greenhouse gas neutralizing in industrial emissions. The method chosen will depend on the required degree of cleaning, composition and volume of gas, properties of reagents and auxiliary materials used possibilities of disposal of cleaning process products and technical and economic indicators of the chosen method. *Value/originality.* The conducted research allows for a comprehensive solution to the greenhouse gas emissions problem, understanding its causes, consequences, and social and chemical-technological solutions.

1. Вступ

Однією з найважливіших екологічних проблем XXI століття є зміна загальнопланетарного клімату через підвищення глобальної середньої температури Землі. Наукова думка, висловлена Міждержавною групою експертів по зміні клімату (МГЕЗК) ООН у 2007 році, полягає в тому, що середня температура на Землі піднялася на 0,7 °C з часу початку промислової революції (з другої половини XVIII століття), і що «велика частка потепління, що спостерігалось в останні 50 років, викликана діяльністю людини», в першу чергу викидами газів, що викликають парниковий ефект. Оцінки, отримані по кліматичних моделях, на які посилається МГЕЗК, кажуть, що в XXI столітті середня температура поверхні Землі може підвищитися на величину від 1,1 до 6,4 °C [1]. Таким чином, профільні експерти пов'язують сучасну зміну клімату з аномальним посиленням природного атмосферного явища – парникового ефекту.

Природний парниковий ефект формується через наявність в атмосфері так званих «парникових» газів, які здатні затримувати сонячне випромінювання у нижніх шарах, не даючи йому підніматися в більш високі шари атмосфери. При цьому відбувається нагрівання, як самої атмосфери, так і земної поверхні. Концентрація парникових газів в атмосфері складає близько 0,1 % об. Такої кількості достатньо для підтримання теплового балансу Землі на рівні, придатному для життя. Але збільшення в атмос-

фері концентрації парникових газів призводить до посилення природного парникового ефекту і порушення теплового балансу Землі.

З точки зору більшості кліматологів природні причини завжди грають певну роль у зміні клімату Землі, але на даний час переважають антропогенні фактори. Значна частина збільшення концентрації парникових газів в атмосфері за останнє сторіччя зумовлена діяльністю людини, особливо спалюванням викопного палива (вугілля, природного газу, нафти), розвитком промисловості, сільського господарства і побутового сектору, вирубкою лісів та ерозією ґрунту.

Потепління планети призведе до небезпечних змін багатьох інших кліматичних моделей, включаючи збільшення швидкості підйому рівня моря та зміни в гідрологічному циклі. Зростаючі концентрації карбон (IV) оксиду роблять океани більш кислими. Поєднання цих складних змін клімату загрожує прибережним містам, продовольчим і водним ресурсам, екосистемам планети тощо [2]. Таким чином, проблема зміни клімату впливає на багато аспектів існування довкілля та суспільства, зокрема людське здоров'я, аномально екстремальні погодні явища, місцеву та глобальну економіку. Отже, розроблення інструментів і способів зниження викидів парникових газів в атмосферу є актуальною задачею сьогодення, що потребує своєчасного і ефективного вирішення.

Метою дослідження наукової роботи є всебічний аналіз стану проблеми викидів парникових газів в Україні та світі, а також визначення основних шляхів вирішення цієї проблеми. Задля досягнення встановленої мети необхідно виконати такі науково-дослідницькі завдання:

- надати загальну характеристику парникових газів;
- визначити головні наслідки зміни клімату для України;
- проаналізувати міжнародні кроки України щодо вирішення проблеми глобальної зміни клімату;
- встановити структуру викидів парникових газів в Україні;
- проаналізувати існуючі та запропонувати оптимальні хіміко-технологічні методи знешкодження парникових газів.

Методологія наукового дослідження зазначеної у роботі проблеми базується на монографічному типі досліджень з використанням загально дослідницьких методів аналізу, синтезу, індукції, дедукції та історичної деталізації.

1. Стан проблеми викидів парникових газів

1.1. Загальна характеристика парникових газів

Присутність парникових газів в атмосфері є причиною того, що частина тепла, яка випромінюється поверхнею Землі, залишається в приземних повітряних шарах. За багато мільйонів років вміст газів, що викликають парниковий ефект, встановився на значенні, яке дозволяє підтримувати теплову рівновагу поверхні планети. Ці гази можуть бути природного і антропогенного походження. До того, як людство приступило до активного розвитку промисловості, основними джерелами парникових газів були випаровування з поверхні Світового океану, вулканічна діяльність і лісові пожежі. Найбільш значними природними парниковими газами атмосфери є водяна пара – H_2O , карбон (IV) оксид – CO_2 , метан – CH_4 , нітроген (I) оксид – N_2O , а також озон тропосфери – O_3 .

Приблизна оцінка внеску різних парникових газів у формування природного парникового ефекту планети наведено в табл. 1.1 [3]:

Таблиця 1.1

Внесок парникових газів у природний парниковий ефект

Газ	H_2O	CO_2	O_3	N_2O	CH_4	Інш.
Внесок, %	63	22	7	4	2	2

У другій половині ХХ століття відбулося посилення природного парникового ефекту внаслідок людської діяльності, що пов'язане із значним зростанням в атмосфері концентрації CO_2 . Починаючи з вісімдесятих років ХХ століття промислові процеси, охолодження та використання різноманітних споживчих продуктів сприяють викидам, так званих, F-газів, до яких належать гідрофторвуглеці – HFCs, перфторвуглеці – PFCs та сульфур (VI) фторид – SF_6 . Завдяки своїм оптичним властивостям ці гази мають здатність затримувати сонячне випромінювання, а отже, також відносяться до парникових газів.

Водяна пара найбільш розповсюджений парниковий газ, але оскільки він характеризується незначним терміном перебування в атмосфері, його антропогенні емісії не призводять до вираженої зміни концентрації пари. Проте, польоти літаків утворюють у нижніх прошарках стратосфери так звані «цирус»-хмари (кристали льоду), які ефективно

абсорбують теплове випромінювання Землі, посилюючи парниковий ефект. Треба відмітити, що потепління, яке відбувається через дію інших парникових газів, збільшує випаровування та призводить до підвищення кількості водяної пари в атмосфері. Це також може становити загрозу для зміни клімату.

Карбон (IV) оксид – найвпливовіший на зміну клімату парниковий газ. Хоча CO_2 має природне походження, завдяки діяльності людини він викидається у найбільшій кількості. Основна частина вуглекислого газу утворюється при видобутку, транспортуванні та спалюванні органічного палива (вугілля, нафти та природного газу). Значні викиди CO_2 відбуваються у транспорті та виробництві електроенергії та тепла. Інші джерела вуглекислого газу – це промислові процеси: виробництво кальцинованої соди, будівельних матеріалів тощо.

Ліси, океани та ґрунти поглинають CO_2 , підтримуючи рівновагу між кількістю CO_2 в атмосфері та у воді і ґрунтах. Але людська діяльність призводить до порушення цієї рівноваги.

За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (англ. International Energy Agency, IEA) [4] майже дві третини рекордного з 2013 року зростання викидів припало на електроенергетику. Глобальні викиди карбон (IV) оксиду, пов'язані з енергетикою, зросли на 1,7 мас. % в 2018 році, досягнувши історичного максимуму, який склав 33,1 Гт CO_2 . Збільшення викидів обумовлено більш високим споживанням енергії в результаті сильної глобальної економіки, а також погодних умов в деяких частинах світу, що призвело до збільшення попиту на енергію для опалення та охолодження.

В останньому варіанті Глобального вуглецевого бюджету (Global Carbon Budget) зазначено, що для утримання підвищення середньої температури кліматичної системи Землі в межах 2 °C (з ймовірністю в 66 %) межа всіх майбутніх викидів CO_2 повинна становити 1 200 млрд. т. При нинішньому рівні викидів (понад 33 000 млрд. т) ця квота буде вичерпана менше ніж за 30 років. Щоб уникнути цього, понад 50 % доступних людству запасів викопного палива треба буде залишити недоторканими, або запровадити в масовому масштабі нові технології запасу CO_2 під землею [3].

Метан утворюється у великих кількостях в результаті біологічних перетворень органічних речовин в природі. Оцінки обсягів щоріч-

них природних джерел та стоків метану в світі складають приблизно 500 млн. т. Основними антропогенними джерелами викидів метану є вирощування рису на дуже зволжених землях, кишкова ферментація тварин та розклад відходів тваринного походження, видобуток та транспортування вугілля, природного газу та нафти, розкладання твердих побутових відходів [5]. Також CH_4 – це супутній продукт спалювання біомаси та неповного згорання палива.

Поглиначами метану є ґрунти та хімічні перетворення в атмосфері.

Природними джерелами атмосферного нітроген (I) оксиду є океани, ґрунти тропічних та помірних широт, ліси та луки. До антропогенних джерел емісії цього газу відносяться спалювання біомаси та викопного природного палива, сільськогосподарська обробка ґрунтів, особливо використання нітрогеновмісних добрив [6], виробництво хімічної продукції.

Найбільша концентрація озону знаходиться у верхніх шарах атмосфери на висоті приблизно 25 км, де формується, так званий озоновий шар, що має захисну дію проти ультрафіолетового випромінювання Сонця. В нижніх шарах атмосфери озон утворюється в результаті хімічних реакцій кисню з іншими атмосферними газами в присутності світла або з промисловими забруднюючими речовинами. Окиснення таких забруднювачів повітря як карбон (II) оксиду – CO, сульфур (IV) оксиду – SO_2 та оксидів нітрогену – NO_x сприяє утворенню озону. Оскільки O_3 є парниковим газом, тому ці речовини можна розглядати як такі, що побічно впливають на парниковий ефект.

Хлорфторвуглеці та фторвуглеці (перфторвуглеці, гідрофторвуглеці та сульфур (VI) фторид) – це гази, яких не було в атмосфері до початку XX століття і які з'явилися виключно в результаті діяльності людини. Джерела цих газів – виробництво алюмінію, магнію, галогенвмісних вуглеводів та інші промислові процеси. Сучасне та очікуване застосування цих сполук включає охолодження та заморожування, кондиціювання повітря, гасіння пожеж, використання аерозолів, розчинників та виробництво поропласту.

Хлорфторвуглеці, відомі як фреони, руйнують озоновий захисний шар Землі, і тому їх виробництво скорочується в усьому світі.

Прогнозується, що використання гідрофторвуглеців і деякою мірою перфторвуглеців та сульфур (VI) фториду суттєво зросте в наступному

десятилітті в зв'язку з важливістю цих сполук як заміників озоноруйнуючих речовин, тобто хлорфторвуглеців. Ці сполуки підсилюють парниковий ефект, оскільки поглинають інфрачервоне випромінювання, яке не поглинули інші гази.

Вплив різних парникових газів на глобальне потепління суттєво відрізняється і залежить від їхніх оптичних властивостей і терміну перебування в атмосфері. Параметр, який чисельно визначає радіаційний вплив молекули певного парникового газу відносно молекули карбон (IV) оксиду називається потенціалом глобального потепління (ПГП). Для розрахунків за Кіотським протоколом (в еквіваленті CO₂) використовуються ПГП із сторічним строком осереднення парникового ефекту. Значення ПГП парникових газів відповідно до Другого оціночного звіту МГЕЗК наведено в табл. 1.2 [7]:

Таблиця 1.2

Потенціал глобального потепління парникових газів

Парниковий газ	Хімічна формула	ПГП
Карбону (IV) оксид	CO ₂	1
Метан	CH ₄	21
Нітрогену (I) оксид	N ₂ O	310
Гідрофторвуглеці	HFCs	140–11 700
Перфторвуглеці	PFCs	6 500–9 200
Сульфур (VI) фторид	SF ₆	23 900

1.2. Наслідки зміни клімату для України

Потепління клімату неминуче призведе до негативних наслідків. Парниковий ефект змінить такі критично важливі змінні величини, як опади, вітер, шар хмар, океанські течії, а також розміри полярних крижаних шапок. Внутрішні райони континентів стануть суші, а узбережжя більш вологими, зими – коротшими і більш теплими, а літо – тривалішим і спекотним.

Найбільш неприємними для людства є два наслідки парникового ефекту. Перший – значне збільшення посушливості в основних зернових районах. Другий – це підйом рівня Світового океану на 2–3 м за рахунок танення полярних льодових шапок, що викличе затоплення багатьох прибережних ділянок. Крім того, найбільш помітним наслід-

ком зміни клімату буде не поступове потепління, а «надзвичайні ситуації», такі як сильні засухи, повені, шторми, урагани, надзвичайно спекотні дні, які відбуватимуться частіше. Рівень світового океану підніметься, а океанічні течії можуть істотно змінитись. Людство буде змушене зіткнутися з проблемами водопостачання та з деградацією сільськогосподарських земель та лісів.

Проблема глобального потепління є надзвичайно актуальною для світу, для Європи і, зокрема, для України. Наша держава належить до числа регіонів планети, де зміни клімату вже є відчутними. За даними метеорологів, темпи поширення глобального потепління в нашій країні вдвічі випереджають динаміку, характерну для північної півкулі планети в цілому. Якщо за останні сто років середня температура на ньому підвищилася на 0,74 °С, то у нас – майже на 1,5 °С. У підсумку зрушили тимчасові рамки сезонів, і зменшилася кількість опадів. Процес зайшов так далеко, що кордони природних кліматичних зон країни вже зрушили на 100–150 км на північ. Наприклад, Дніпропетровська та Кіровоградська області, які традиційно входили в зону північного степу, зараз можна вважати південний степом, для якої характерні постійні посухи. Черкаська та Полтавська області завжди належали до лісостепу, а зараз зараховуються до північного степу, а південні області (Херсонська, Запорізька, Крим), по суті, стають пустелею. Якщо так піде далі, протягом найближчих 20 років Україна ризикує втратити більше половини всіх орних земель, що призведе до зниження валового збору зерна, овочів і фруктів, які традиційно вирощуються в степових регіонах [8].

Крім того, відбувається посилення мінливості погоди, а саме, сильні морози, що змінюються різкими відлигами взимку, та зростання числа надзвичайно спекотних днів влітку. Спостерігається нерівномірність випадання опадів у вигляді снігу та дощу. На території країни почастишали природні катаклізми, такі як посухи, суховії, лісові пожежі, зливи, повені, затоплення, обледеніння тощо.

Наслідки кліматичних змін можуть впливати на добробут, умови проживання і здоров'я населення в певних регіонах України. Грунтуючись на висновках МГЕЗК про глобальні та регіональні наслідки від зміни клімату, та результатах, опублікованих вченими України, можна зробити висновки, що підвищення вмісту парникових газів в атмос-

фері може викликати: гостру нестачу питної води в центральних та східних регіонах України; переміщення у помірні і північні зони субтропічних циклонів, які сприятимуть опустеленню півдня України; незворотну деградацію степів Причорномор'я, Приазов'я та степової частини Криму; зростання загрози катастрофічних повеней у Карпатах; підвищення рівня Чорного і Азовського морів, активізацію явищ підтоплення територій, абразії берегів морів і водосховищ; зниження продуктивності лісу на всій території України, зокрема внаслідок поширення епіфітотій та шкідників [9].

Негативний вплив на безпеку на економіку країни також може мати масова міграція населення з південно-східних регіонів, де буде спостерігатися значне погіршення умов проживання внаслідок стрімкої зміни природно-кліматичних умов та загроза поширення інфекційних захворювань непритаманних Україні (малярія, лихоманка Денге тощо). За таких прогнозів Україні потрібно невідкладно розробити та розпочати реалізацію заходів щодо зменшення викидів парникових газів та адаптації найбільш вразливих територій та секторів економіки до наслідків зміни клімату.

1.3. Міжнародні кроки України щодо вирішення проблеми глобальної зміни клімату

Зміна клімату вже давно не лише екологічна проблема. Це питання, яке стосується всіх сфер економіки та міжнародної безпеки. Отже, для вирішення потенційної загрози глобальної зміни клімату необхідна координація зусиль світової спільноти, політичних діячів та відповідних експертів. Першим кроком у вирішенні цієї проблеми було прийняття у 1992 році Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, мета якої полягала в об'єднанні зусиль щодо запобігання небезпечних змін клімату і стабілізації концентрації парникових газів в атмосфері.

Україна підписала Рамкову Конвенцію ООН про зміну клімату у червні 1992 року, ратифікувала її в жовтні 1996 року, а у серпні 1997 року стала Стороною Конвенції.

Україна також підтримала ідеї, сформульовані у Кіотському протоколі – міжнародній угоді про обмеження викидів до атмосфери парникових газів, прийнятої на додаток до Рамкової конвенції про зміну клімату у грудні 1997 року. Протокол зобов'язував розвинуті країни та

країни з перехідною економікою скоротити або стабілізувати викиди парникових газів до рівня 1990 р. Підписавши і ратифікувавши цю угоду у лютому 2005 року, Україна має право кожен рік викидати близько 920 млн. т еквіваленту карбон (IV) оксиду, що відповідає рівню викидів 1990 року, а надлишки – продавати.

У грудні 2012 року в рамках Конференції ООН по клімату було розроблено пакет рішень, який отримав назву «Дохійський кліматичний портал», у якому було прийнято поправки до Кіотського протоколу. Україна, приймала активну участь у Конференції, за результатами якої взяла на себе зобов'язання по зменшенню кількості викидів парникових газів у період з 2013 по 2020 роки на 20 % порівняно з базовим 1990 роком.

Однак, механізми скорочення викидів, запропоновані Кіотським протоколом, зокрема, продаж квот на викиди виявилися не в повній мірі ефективними. Тому світові лідери, розуміючи нагальну потребу скорочення викидів парникових газів, домовилися укласти нову угоду [10]. 12 грудня 2015 року у Парижі під час роботи 21-ї Конференції сторін Рамкової конвенції ООН про зміну клімату була прийнята Паризька угода, яка прийшла на зміну Кіотському протоколу, термін дії якого закінчився в 2020 році. Її головна ціль – утримати підвищення середньої температури Землі в межах 2 °С і спробувати скоротити його до 1,5 °С до 2100 року. Угода набрала чинності 4 листопада 2016 року.

Умовою для вступу угоди в силу була її ратифікація 55 країнами, на частку яких припадає 55 % загальносвітового обсягу викидів парникових газів. На відміну від Кіотського протоколу, Паризька кліматична угода передбачає, що зобов'язання зі скорочення шкідливих викидів в атмосферу беруть на себе всі держави, незалежно від ступеня їх економічного розвитку. Україна, як і більшість держав світу, підписала угоду 22 квітня 2016 року у штаб-квартирі ООН в Нью-Йорку, а 1 серпня 2016 року підписала закон «Про ратифікацію Паризької угоди».

Відповідно до Паризької угоди участь кожної окремої країни у досягненні світової мети визначається нею індивідуально та має назву «національно-визначений внесок». На переговорах у Парижі Україна озвучила свою ціль із скорочення викидів на 40 % до 2030 року відносно рівня викидів парникових газів базового 1990 року. Проте згідно з новою глобальною ціллю Паризької угоди (2 °С), у разі припущення

пропорційності викидів парникових газів до зміни глобальної температури, ціль мусить бути скоригована. Наприкінці липня 2021 року уряд України затвердив оновлений Другий Національний визначений внесок України до Паризької Угоди, згідно з яким актуальна кліматична мета України – скоротити до 2030 року викиди парникових газів на 65 % від рівня 1990 року [11].

Однією з вимог Паризької угоди до країн-підписантів є розробка Стратегії низьковуглецевого розвитку до 2050 року. Відповідно цього у 2016 році в Україні було розроблено і затверджено Концепцію реалізації державної політики у сфері зміни клімату, яка базується на розвитку двох основних напрямів: скороченні споживання енергетичних ресурсів за рахунок підвищення енергоефективності та енергозбереження та використанні відновлювальних джерел енергії.

За даними Міжнародного енергетичного агентства використання вугілля є однією з найбільших причин викидів парникових газів. У зв'язку з цим на кліматичному саміті COP26, який відбувся у Глазго на початку листопада 2021 року, понад 40 країн світу домовилися поступово відмовитись від використання вугілля для виробництва електроенергії. Найбільші економіки світу повинні відмовитися від вугільної генерації до 2030 року, менші – до 2040 року. У свою чергу, Україна в рамках цієї домовленості пообіцяла повністю відмовитись від використання вугілля в енергетиці до 2035 року. Це має означати, що будувати нові ТЕС чи шахти в країні більше не будуть, а старі державні потужності поступово зачиняться [12].

1.4. Структура викидів парникових газів в Україні

Згідно міжнародних вимог (Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, Кіотського протоколу, Паризької угоди) Україна повинна регулярно надавати інформацію щодо національного кадастру антропогенних викидів із джерел і абсорбції поглиначами парникових газів. Така інформація необхідна для відстеження прогресу в здійсненні і досягненні заявлених країнами зобов'язань за рівнем викидів парникових газів, а також для визначення впливу зміни клімату на розвиток окремих країн та світового суспільства загалом. Відповідно цього в Україні проводиться щорічна інвентаризація антропогенних парникових викидів з різних джерел.

У Річному звіті про національну інвентаризацію парникових газів протягом 1990–2019 років, представленому у 2021 році, контроль відбувається за сьома парниковими газами прямої дії: карбон (IV) оксидом, метаном, нітроген (I) оксидом, гідрофторвуглецьями, перфторвуглецьями, сульфур (VI) фторидом, нітроген (III) фторидом; та п'ятьма парниковими газами непрямої дії: карбон (I) оксидом, оксидами нітрогену, неметановими леткими органічними сполуками та сульфур (IV) оксидом. Інвентаризація здійснюється в наступних секторах, визначених МГЕЗК: «Енергетика», «Промислові процеси та використання продукції» (ППВП), «Сільське господарство», «Землекористування, зміна землекористування та лісове господарство» (ЗЗЛГ), «Відходи».

За даними Національного кадастру антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990–2019 роки, викиди парникових газів в Україні у 2019 році склали 332,2 млн т CO₂-екв. (з урахуванням сектору ЗЗЛГ) або 273,9 млн т CO₂-екв. (без урахуванням сектору ЗЗЛГ), що відповідає скороченню на 62,4 % від рівня 1990 року. Кількість викидів парникових газів прямої дії у перерахунку на CO₂-екв. відповідно зазначеного у Річному звіті періоду наведена в табл. 1.3 і табл. 1.4 [13].

З даних табл. 1.3 видно, що внесок CO₂ у загальні викиди парникових газів в Україні є найбільш значним і складає 71 %. Частка CH₄ серед парникових газів становить близько 18 %. Викиди N₂O наближаються до 10 % від загальної кількості антропогенних парникових газів.

Таблиця 1.3

Викиди парникових газів за роками (Мт CO₂-екв.)

Роки	Парникові гази						
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFCs	PFCs	SF ₆	NF ₃
1990	691,3	179,4	41,7	НЗ НВ	0,2	1,0·10 ⁻⁵	НЗ
2019	273,9	69,8	38,2	1,6	НЗ НВ	0,04	НЗ НВ

Скорочення: НЗ – не застосовується, НВ – не відбувається.

Аналіз даних табл. 1.4 вказує на те, що основна кількість парникових викидів у перерахунку на CO₂-еквівалент утворюється в Енергетиці. У 2019 році на цей сектор припало близько 66 % викидів без секто-

Викиди парникових газів за секторами (Мт CO₂-екв.)

Роки	Сектори				
	Енергетика	ППВП	Сільське господарство	ЗЗЛГ (виділення)	Відходи
1990	698,3	118,0	84,8	61,8	11,6
2019	219,2	58,2	42,5	51,4	12,2

ру ЗКЗЛГ. При цьому, згідно¹³ близько 78 % викидів сектору «Енергетика» відноситься до категорій: промислова енергетика, виробництво і будівництво, транспорт та інші. Решта – 22 % – це неконтрольовані викиди парникових газів, що утворюються під час спалювання викопного палива. Частка інших секторів складає відповідно: промислові процеси та використання продукції – 17 %, сільське господарство – 13 %, Відходи – 4 %.

Найбільші викиди парникових газів в промисловості пов'язані саме з карбон (IV) оксидом. Викиди CO₂ в секторі «Промислові процеси та використання продуктів» утворюються у виробництві цементу, вапна, чавуну й сталі, феросплавів, аміаку, скла, а також пов'язані з виробництвом і використанням соди, вапняку й доломіту. Викиди CH₄ в промисловому секторі мають місце, в основному, у виробництві чавуну і коксу, а викиди N₂O – у виробництві неконцентрованої нітратної і адипінової кислот.

Головними джерелами забруднення атмосферного повітря в Україні від викидів стаціонарних джерел є підприємства паливно-енергетичного комплексу – 43,8 % від загального обсягу викидів, підприємства переробної – 30,4 % та видобувної промисловості – 17,5 % відповідно. Серед багатьох секторів економіки хімічна та нафтохімічна промисловості належать до найбільших споживачів енергії. На їх частку припадає близько 10 % від загального споживання енергії та 7 % від загальної кількості антропогенних викидів парникових газів у світі [14].

На долю виробництв хімічної продукції припадає лише 0,6 % від загального об'єму викидів переробної промисловості. Але характерною особливістю газових відходів хімічної галузі є їх різноманітність та висока токсичність порівняно з іншими виробництвами. З огляду на те, що хімічний сектор є фундаментальною основою для синтезу ба-

гатьох основних проміжних і кінцевих продуктів з метою задоволення потреб людини, прогнозується подальший його розвиток, що, в свою чергу, призведе до збільшення викидів парникових газів.

До основних забруднюючих речовин хімічної промисловості з точки зору їх приналежності до парникових газів прямої і непрямой дії відносять оксиди карбону, нітрогену та сульфуру. Вибір найбільш ефективних організаційних і технічних способів зменшення кількості викидів небезпечних газів у межах діючих виробництв є актуальним завданням, якому присвячено другий розділ цієї наукової роботи.

2. Аналіз методів скорочення викидів парникових газів

2.1. Очищення газів від карбон (IV) оксиду

Карбон (IV) оксид – це кислотний оксид, який обмежено розчиняється у воді і добре взаємодіє з лугами, розчинами солей, що мають лужні властивості, органічними сполуками, що містять гідроксильні групи і при зниженій температурі і підвищеному тиску добре розчиняється в спиртах, в ацетоні та інших органічних розчинниках. Особливостями CO_2 є здатність сублимувати при температурі мінус 78°C та скраплюватися при тиску до 5,65 МПа і температурі 20°C .

Карбон (IV) оксид не відноситься до класу токсичних сполук, отже санітарно-гігієнічний норматив – гранично допустима концентрація для нього відсутній. Але в умовах виробничих і житлових приміщень бажано, щоб вміст CO_2 був не більше 0,6–0,7 об. %, так як тривале перебування при високих концентраціях CO_2 викликає стомлюваність, головний біль і небажані зміни в організмі людини.

Серйозно проблемою зниження викидів карбон (IV) оксиду почали займатися ще з 70-х років минулого століття. Спочатку технології знешкодження були зосереджені на уловлюванні і зберіганні CO_2 , який утворювався на вугільних електростанціях, шляхом його закачування глибоко під землю. Такий спосіб використовувався тільки нафтовими компаніями, щоб вводити газ з карбон (IV) оксидом у свердловини для збільшення повноти видобутку нафти. Зараз в Україні також проводяться дослідження щодо вдосконалення и впровадження цього методу [15].

Для знешкодження карбон (IV) оксиду у викидах різних джерел використовують абсорбційні, адсорбційні та каталітичні способи (табл. 2.1) [16].

Найбільш широке застосування знайшли абсорбційні способи очищення, які основані або на хімічному зв'язуванні CO_2 – хемосорбції, або на його розчинності – фізичної абсорбції, а також їх комбінуванні. У сучасних технологіях очищення газових викидів від карбон (IV) оксиду перше місце посідає поглинання CO_2 аміноспиртами – хімічна абсорбція. Як хемосорбенти у виробництві застосовують водні розчини етанольної амінокислоти [17]:

– МЕА – моноетаноламін $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})\text{NH}_2$ – густа масляниста рідина з температурою кипіння 170°C , змішується з водою в усіх співвідношеннях, слабка основа, токсична (ГДК = 30 мг/м^3);

– ДЕА – діетаноламін $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_2\text{NH}$ – густа масляниста рідина з температурою кипіння 280°C , добре змішується з водою, сильна основа;

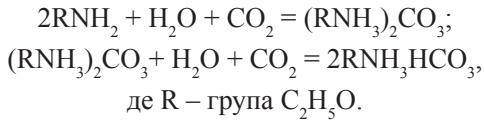
– ТЕА триетаноламін $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{N}$ – безбарвна рідина з температурою кипіння 335°C , змішується з водою в усіх співвідношеннях, слабка основа.

Таблиця 2.1

**Промислові способи очищення технологічних газів
від карбон (IV) оксиду**

Спосіб	Продукт після очищення	Вміст CO_2 в газі для очищення, об. %
Абсорбційні методи		
Поглинання розчинами аміноспиртів	CO_2	≤ 30
Поглинання карбонатними розчинами (Na_2CO_3 , K_2CO_3)	CO_2	≤ 30
Промивання органічними розчинниками (CH_3OH , ацетон)	CO_2	≤ 30
Промивання водою	CO_2	будь-який
Поглинання розчинами лугів (NH_3 , KOH , NaOH)	Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NH_4HCO_3	$\leq 0,3$
Адсорбційні методи		
Поглинання фізичними сорбентами	CO_2	≤ 40
Поглинання хімічними сорбентами	CO_2	≤ 20
Каталітичні методи		
Відновлення воднем (метанування)	CH_4 , H_2O	$\leq 0,6$

Присутність гідроксильних груп визначає лужні властивості етаноламінів, а отже їх здатність взаємодіяти з карбон (IV) оксидом. Найбільшу поглинальну здатність має МЕА, проте через більш високу летючість (тиск пари складає $0,2 \times 10^{-9}$ МПа при температурі 38 °С) можливе забруднення газу, що очищується, парами МЕА, тому на практиці використовують суміші етаноламінів і інших речовин. Процес взаємодії карбон (IV) оксиду з моноетаноламіном може бути описаний наступними рівняннями:



Етаноламіни добре розчинні у воді (максимальна концентрація становить 50 мас. %), однак викликають корозію металів, тому для обмеження цього явища при очищенні застосовують розчини з вмістом етаноламінів 10–20 мас. %. Сучасні установки працюють під тиском до 2,76 МПа при температурі 35–47 °С.

Відпрацьовані розчини аміноспиртів піддають регенерації при підвищенні температури до кипіння розчину. Найбільший ефект досягається при тиску 0,138–0,246 МПа, коли теплота десорбції газів вища за теплоту випаровування розчинника. При цьому відбувається більш повна регенерація розчину при менших витратах теплоти.

За аналогією з етаноламіновим очищенням здійснюється поглинання карбон (IV) оксиду карбонатними розчинами, зазвичай натрію або калію. У промисловості існують різні модифікації цього процесу, основними відмінностями яких є різні активатори, температура і концентрація розчинів. Найбільше застосування одержав метод очищення гарячими розчинами поташу під тиском 2,56–2,95 МПа з масовою концентрацією K_2CO_3 20–30 %. Як активатор додають приблизно 2 % ДЕА, як інгібітор від корозії – 0,5 мас. % V_2O_5 . Температуру в процесі абсорбції підвищують від 87 до 107 °С, температуру регенерації підтримують не нижче 117 °С [16].

Після очищення газу розчинами етаноламінів і поташу газ у своєму складі містить 0,03–0,05 об. % CO_2 , що вимагає подальшого тонкого очищення. Крім того, в цьому випадку не вилучається СО, вміст якого в технологічному газі може становити 0,3–0,4 об. %.

Треба зазначити, що перед проведенням процесу хімічної абсорбції карбон (IV) оксиду з викидних газів необхідно вилучити SO_2 та NO_x , які теж в ньому присутні. Для цього використовують відповідні способи очищення.

Досить широкий розвиток отримав процес очищення технологічних газів від карбон (IV) оксиду способом фізичної абсорбції при низьких температурах. Спосіб ґрунтуються на високій розчинності CO_2 в органічних полярних розчинниках при низьких температурах і підвищених тисках і легко видаляються з них при зниженні тиску. Найбільше практичне застосування знайшли процеси очищення, де як розчинник використовується метанол (процес «Ректізол») і ацетон. Видалення CO_2 здійснюють під тиском 0,5–1,5 МПа при температурі від мінус 40 до мінус 80 °С.

Основними перевагами низькотемпературної абсорбції є:

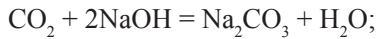
- низькі питомі витрати розчинника через його високу поглинальну здатність при підвищеному тиску і низьких температурах;
- значне зниження питомої витрати енергії, так як насичений розчинник охолоджується внаслідок зниження тиску на ступені регенерації;
- низька корозія обладнання;
- доступність і низька вартість застосовуваних розчинників.

У той же час такі схеми мають і недоліки, головними з яких є ретельний монтаж, висока культура обслуговування, висока теплоізоляція обладнання.

Промивання газу, що містить CO_2 , водою на практиці використовуються як попереднє очищення. Процес проводять в інтервалі температур 5–15 °С при підвищеному тиску 1,0–3,0 МПа. Витрата води на зрошення становить 0,1 м³ на 1 м³ газу, що очищається. У разі використання підвищеного тиску регенерацію CO_2 доцільно проводити шляхом зниження тиску розчину після поглинання в спеціальних апаратах – регенераторах. Перевагою цього способу є простота та відносна невелика вартість. Головними недоліками є невисока ступінь очищення – приблизно 70–80 %, що обумовлено максимальною поглинальною здатністю води (8 кг CO_2 на 100 кг води), та низькою селективністю [15].

Поглинання карбон (IV) оксиду в газових викидів за допомогою водних розчинів лугів раціонально як варіант кінцевого очищення незначних обсягів газу з невисоким вмістом CO_2 . У інших випадках

вибір методу визначатиме техніко-економічна доцільність процесу. Автори роботи [18] пропонують використовувати як поглинач розчин NaOH, що дасть можливість отримати товарний продукт – кальціновану соду, продаж якої компенсує вартість процесу очищення. У дослідженнях [19] доведено ефективність знешкодження карбон (IV) оксиду з використанням водного розчину аміаку. Такий інтегрований підхід дозволить не тільки видалити CO₂ з газових викидів, але й таким чином знизити вміст NH₃ в розчині, що мінімізує споживання енергії для вилучення аміаку в певній технології. В цьому випадку процес очищення може бути описаний реакціями:



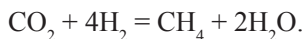
У даний час найбільш перспективним способом очищення технологічних газів від карбон (IV) оксиду вважається фізична та хімічна адсорбція. Основна відмінність цих двох видів обумовлена енергетичною характеристикою зв'язків. Фізична адсорбція викликана силами Ван-дер-Ваальса, тому теплота фізичної адсорбції має невелике значення і складає 10–30 кДж/моль. Для цього процесу можлива регенерація адсорбенту. Крім того процес протікає при низьких температурах (близько 20 °С). Фізична адсорбція може протікати на активному вугіллі, силікогелі, алюмогелі, проте мала адсорбційна ємність обмежує їх використання. Тому, в основному, в промисловості для очищення від CO₂ застосовують синтетичні цеоліти, що володіють селективністю і високою сорбційною ємністю. Стадія десорбції проводиться шляхом нагрівання адсорбенту, продувкою інертним газом і вимагає значних енерговитрат.

Хімічна адсорбція заснована на хімічному зв'язку між адсорбатом і адсорбентом, в результаті чого утворюються поверхневі сполуки. Процес носить активаційний характер, адже теплота реакції складає близько 100–400 кДж/моль. Як хімічні адсорбенти застосовують оксиди заліза і цинку, але їх використання обмежене через низьку технологічність, неможливість регенерації та необхідність утилізації відпрацьованого сорбенту. Високотемпературними адсорбентами, що працюють в циклах сорбція-десорбція, для селективного поглинан-

ня карбон (IV) оксиду можуть бути використані: прожарені доломіт, гідроталькити, силікати і цирконати лужних металів, оксид кальцію, модифікований катіонами лужних металів. Такі поглиначі здатні видаляти CO_2 з газів при температурі 400–900 °С [17].

Крім зазначених способів очищення газів від карбон (IV) оксиду застосовуються також каталітичні методи, які базуються на гетерогенному каталізі шляхом перетворення домішок в нешкідливі сполуки або ті, що легко видаляються з газу. Даний метод застосовується, коли в газі присутні домішки, які недостатньо повно видаляються за допомогою рідинних поглиначів або адсорбентів, тобто як тонка очистка.

Процес каталітичного очищення відбувається шляхом відновлення CO_2 за допомогою водню на поверхні каталізатора [16]. Як каталізатор використовують системи, що складаються з активної фази (оксидів кобальту, нікелю, молібдену) і носія – алюмінію оксиду. Найбільш ефективними в цьому випадку є нікель-алюмінієві каталізатори (30–50 мас. % NiO), які під час процесу відновлення мають високу активну поверхню, термостійкість і міцність. Технологічні параметри становлять: температура – 250–400 °С, тиск – до 29,6 МПа, об'ємна швидкість газу 6000–20000 год⁻¹. Процес описується наступною хімічною реакцією:



Основною перевагою каталітичного способу є високий ступінь очищення (до 98 %). Основні недоліки – певні вимоги до якості каталізатора, жорсткі вимоги до складу газу, якій очищується, щодо вмісту сполук сірки, які є каталітичною отрутою, утворення нових речовин, що треба видаляти з газу.

У даний час серед способів знешкодження карбон (IV) оксиду в промислових газових викидах значна частка припадає на очищення за допомогою розчинів етаноламінів – 62 %, частка інших технологій становить приблизно 15 %, решта – викиди неочищеного газу [16].

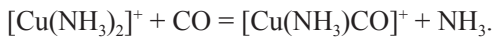
2.2. Очищення газів від карбон (II) оксиду

Карбон (II) оксид (CO) – безбарвний газ, який не має запаху, відомий також під назвою «чадний газ». Утворюється під час неповного згоряння вугільного палива (вугілля, газу, нафти) за умов нестачі кисню та низької температури. При вдиханні CO через наявність в його

молекулі потрійного зв'язку ($C \equiv O$) утворює міцні комплексні сполуки з гемоглобіном крові людини і тим самим блокує надходження кисню в кров. Це викликає головні болі, нудоту, а при високих концентраціях в повітрі більше 0,1 об. % призводить до смерті протягом однієї години. Чадний газ відноситься до 4 класу небезпеки. Для нього встановлено наступні санітарно-гігієнічними показники (гранично допустимі концентрації): максимально разова $ГДК_{м.р.} = 5 \text{ мг/м}^3$, середньодобова $ГДК_{с.д.} = 3 \text{ мг/м}^3$, робочої зони $ГДК_{р.з.} = 20 \text{ мг/м}^3$. Крім того, карбон (II) оксид відноситься до парникових газів непрямої дії, посилюючи парниковий ефект Землі [20].

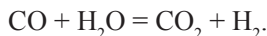
Для очищення викидних або технологічних газів від карбон (II) оксиду на хімічних підприємствах використовують два методи: адсорбційний і каталітичний.

Для вилучення карбон (II) оксиду з газів, у яких його вміст становить понад 10 об. %, найбільше поширення одержав адсорбційний метод очищення за допомогою розчинів купрум-аміачних солей різних кислот, які мають властивості утворювати з CO комплексні сполуки [17]. На практиці застосовують аміачні розчини солей одновалентного купруму оцтової, мурашиної та карбонової кислот:



Іони двохвалентного купруму не можуть зв'язувати карбон (II) оксид, але їх наявність (до 20 мас. %) необхідна, так як це запобігає реакції, яка призводить до випадання металічного купруму. Для утворення катіонів двохвалентного купруму в систему подають повітря. Адсорбцію CO проводять при високому тиску 32 МПа та низькій температурі 5–15 °С, що створює великі проблеми в літній час. Регенерацію хемосорбенту здійснюють при атмосферному тиску та температурі близько 80 °С. Вищі температури призводять до інтенсивного виділення аміаку.

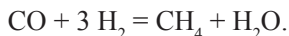
У деяких виробництвах також широко використовують каталітичний метод парової конверсії карбон (II) оксиду:



Процес проводять при значних концентраціях CO (12–13 об. %) як першу стадію очистки [17]. У промислових умовах конверсію здійснюють у два ступеня під тиском 0,1–3,0 МПа. На першому ступені на

середньотемпературному залізохромовому каталізаторі підтримують температуру 430–460 °С, забезпечуючи високу інтенсивність процесу, незважаючи на неповний ступінь перетворення СО в СО₂. На другому ступені на низькотемпературному каталізаторі на основі оксидів купрум, цинку, хрому і алюмінію при 220–270 °С і низькій початковій концентрації СО (3–6 об. %) процес проходить практично до кінця. Така схема дозволяє підвищити ступінь перетворення карбон (II) оксиду та знизити витрати водяної пари. Кінцевий вміст СО у газі становить не більше 0,15–0,5 об. %.

Процес метанування призначений для видалення залишкових кількостей карбон (II) оксиду (до 0,6 об. %) із газів і використовується як заключна стадія очищення газу після каталітичного перетворення СО в СО₂:



Процес проводять на нікель-алюмінієвому каталізаторі при температурі 250–400 °С і тиску до 29,6 МПа. Залишковий вміст карбон (II) оксиду в очищеному газі не перевищує 0,0003 об. % [17].

2.3. Очищення газів від оксидів нітрогену

Одними з найнебезпечніших забруднювачів атмосфери є оксиди нітрогену, а саме N₂O, NO і NO₂.

Нітроген (I) оксид володіє найвищим потенціалом глобального потепління, який у 310 разів перевищує цей показник для карбон (IV) оксиду. Крім того, цей оксид сприяє руйнуванню озонового шару Землі, оскільки у стратосфері N₂O піддається фотолізу та реагує з атомами кисню з утворенням NO, який входить у відомий цикл руйнування молекул O₃ [21].

За нормальних умов N₂O – це неотруйний безбарвний негорючий газ зі слабким запахом і приємним солодкуватим присмаком. У суміші з оксисеном має знеболювальну наркотичну дію. У зв'язку з цим, нітроген (I) оксид застосовують у вигляді інгаляційної анестезії. За неспецифічним механізмом він впливає на мембрани нейронів і пригнічує передачу їх нервових імпульсів по центральній нервовій системі, змінюючи при цьому кірково-підкіркову взаємодію.

Оксиди нітрогену – NO_x – збірна назва оксидів нітрогену – NO і NO₂, до яких встановлено санітарно-гігієнічні обмеження. Це пояс-

нуються шкідливим впливом даних оксидів на здоров'я людини і стан довкілля. NO і NO₂ в атмосфері зустрічаються разом, тому найчастіше оцінюють їх сумісну дію. Під час згоряння палива приблизно 90 % об. оксидів нітрогену утворюється у формі нітроген (II) оксиду – NO. Решта 10 % об. припадає на нітроген (IV) оксид – NO₂. Однак в ході хімічних реакцій в атмосфері значна частина NO перетворюється на NO₂ – набагато більш небезпечну речовину, що підтверджується значеннями санітарно-гігієнічних нормативів, наведених у табл. 2.2 [22]:

Таблиця 2.2

Нормативні санітарно-гігієнічні характеристики оксидів нітрогену

Речовина	Клас небезпеки	ГДК _{м.р.} , мг/м ³	ГДК _{с.л.} , мг/м ³	ГДК _{р.з.} , мг/м ³
NO	3	0,4	0,06	5
NO ₂	2	0,085	0,04	2

Нітроген (II) оксид є безбарвним газом, який не подразнює дихальні шляхи, і тому людина може його не відчувати. Але при вдиханні NO впливає на центральну нервову систему, а також викликає ураження крові за рахунок зв'язування гемоглобіну. Нітроген (IV) оксид – це бурий газ з характерним неприємним запахом. Він значно дратує слизові оболонки дихальних шляхів, може призвести до серйозного отруєння, а також викликати сенсорні, функціональні та патологічні ефекти в організмі людини.

Зокрема посилення парникового ефекту негативний вплив оксидів нітрогену на довкілля пов'язаний з утворенням кислотних дощів та формуванням явища смогу. Крім того, тривалий вплив NO₂ в концентрації 470–1880 мкг/м³ може пригнічувати ріст деяких рослин.

Загалом способи зниження викидів оксидів нітрогену в атмосферне повітря поділяються на первинні та вторинні [23]. До первинних належать заходи щодо оптимізації процесу горіння палива і конструкції обладнання, в результаті чого знижується концентрація оксидів нітрогену у вихлопних газах. Ці методи в більшості випадків стосуються NO_x. Первинні заходи маловитратні і тому їх застосовують, перш за все, для забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних вимог. Вторинні способи полягають в очищенні вихлопних газів від N₂O і NO_x перед їх викиданням в атмосферу і потребують істотних додаткових витрат.

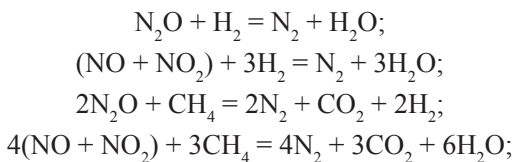
Аналіз механізму утворення NO і NO₂ при спалюванні викопного палива вказує на те, що зменшити їх утворення можна шляхом зниження температури горіння, зменшення часу перебування продуктів згоряння в області високих температур, створення зон реакцій з відновним середовищем (надлишком повітря < 1), в якому утворення оксидів нітрогену з палива утруднено та їх відновлення йде до молекулярного азоту. В цьому випадку проводять наступні первинні або режимно-технологічні заходи:

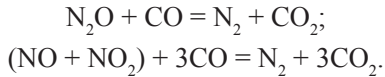
- використовують пальники з низьким викидом оксидів нітрогену (зниження NO_x до 60 %);
- ступеневе спалювання палива (зниження NO_x на 35–45 %);
- ступінчасту подачу повітря (зниження NO_x до 50 %);
- рециркуляцію димових газів (зниження NO_x до 33 %);
- впорскування води або водо-мазутних емульсії в ядро факелу (зниження NO_x на 25–44 %);
- комбінацію первинних заходів (зниження NO_x до 90 %).

До вторинних способів знешкодження оксидів нітрогену відносять каталітичні та некаталітичні (абсорбційні, адсорбційні) методи очищення викидних газів від токсичних домішок.

Найбільш ефективним способом знешкодження є каталітичне відновлення оксидів нітрогену. Так, для денітрифікації газів розроблені і промислово освоєні каталітичні процеси високотемпературного і селективного низькотемпературного відновлення з використанням високоактивних каталізаторів.

Перший процес протікає в безкисневому середовищі при температурі 300–1000 °С. Відновниками служать H₂, CO, CH₄, природний газ, нафтовий і коксовий гази, азотоводнева суміш. У результаті реакцій оксиди нітрогену відновлюються до N₂, також утворюється водяна пара і карбону (IV) оксид та виділяється велика кількість теплоти. Залежно від газу-відновника процес очищення можна описати наступними сумарними рівняннями реакцій:





Особливість високотемпературного відновлення оксидів нітрогену горючими газами полягає в тому, що процес потребує початкового «випалювання» кисню, який знаходиться у викидних газах, що супроводжується підвищенням температури реакції і додатковими витратами відновника.

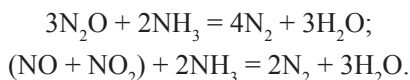
Ефективність процесу визначається активністю каталізатора, що використовується. Високу каталітичну активність мають каталізатори на основі Pt, Pd, Ru, Rh, менш активними є сполуки Mn, V, Cu, Fe, C, Co, Mo, Ni, W, Ag, Zr, Bi, Al, Si, Pb. Для здешевлення каталізатора та збільшення поверхні його контакту з газом, що очищується, активний компонент наносять на кераміку, оксид алюмінію або силікагель.

Відповідно до каталізаторів очищення газів висувають дуже жорсткі вимоги щодо високої активності і вибіркової каталітичної дії, термостабільності, стійкості до дії отрути, високої механічної міцності, великої теплопровідності. Каталізатори повинні бути потенційно безпечними, а їх виробництво не повинно привносити додаткове забруднення в навколишнє природне середовище.

Перевагами процесу високотемпературного відновлення є проста хімічних перетворень, висока ступінь очищення (залишковий вміст оксидів нітрогену не перевищує 0,005 % об.), відсутність необхідності в додатковій теплообмінній апаратурі. До недоліків методу треба віднести високу вартість і дефіцитність каталізаторів, що використовуються; обмеження щодо вмісту у викидних газах оксидів нітрогену (не більше 0,5 % об.), кисню (не більше 4–5 % об.) та сполук сульфору (повна відсутність), які виступають каталітичною отрутою; значні витрати газів-відновників на взаємодію з киснем; висока температура процесу, що потребує використання певних матеріалів для виготовлення обладнання [22].

Процес селективного низькотемпературного каталітичного відновлення оксидів нітрогену вигідно відрізняється від високотемпературного тим, що протікає вибірково: відновник, найчастіше аміак, реагує переважно з оксидами нітрогену і практично не взаємодіє з киснем, що знаходиться у викидних газах. У зв'язку з цим аміак витрачається у кількостях еквівалентних вмісту оксидів нітрогену, або перевищує

стехіометрію на 10–5 % з метою більш повного протікання реакцій. В ході реакцій утворюється тільки азот і вода та виділяється невелика кількість теплоти. Отже, процес відновлення здійснюється при порівняно низьких температурах (180–360 °С) і може бути представлений такими реакціями:



Але недоліки процесу полягають також у високій вартості каталізатора, яка складає близько 30 % від витрат на очищення, та низької ефективності при високих концентраціях оксидів нітрогену у викидних газах. Крім того, одночасна присутність N_2O , NO і NO_2 у викидному газі викликає деякі складності щодо знешкодження нітроген (I) оксиду. Цю ситуацію можна виправити шляхом оптимізації процесу низькотемпературного відновлення щодо температурного режиму за вибору більш селективного каталізатору по відношенню до N_2O [24].

Певне розповсюдження отримали адсорбційні методи знешкодження оксидів нітрогену у газових викидах [23]. Як адсорбенти використовують 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. Процеси протікають, як правило, при порівняно низьких температурах, що складають 80–130 °С. Ступінь очищення становить 70–90 %.

Загальними перевагами адсорбційних методів є простота і достатня ефективність процесу. Але суттєві недоліки обмежують їх широке використання, а саме: циклічність процесу (адсорбція – десорбція), яку проводять при підвищених температурах, та необхідність подальшого знешкодження газів, виділених при десорбції; поглинання адсорбентом пилу, який швидко забиває його пори і не видаляється при десорбції. При промиванні адсорбенту водою утворюються стоки розведеної нітратної кислоти, забруднені різними домішками, в тому числі і важкими металами. Адсорбційні методи можна застосовувати для очищення невеликих об'ємів низькоконцентрованих газів (не більше 1 %).

Знешкодження оксидів нітрогену різними рідинними поглиначами (абсорбентами) є одним з найпоширеніших в промисловості

способів [22]. Доступність і розповсюдженість методів абсорбційної очистки значною мірою визначається тим, що на відміну від більшості сухих способів (каталітичні методи, адсорбція), вони не залежать від концентрацій оксидів нітрогену в газах, що очищуються, і не вимагають застосування високих температур. Залежно від способу організації процесу розглядають наступну класифікацію абсорбційних методів очищення газів від оксидів нітрогену [22]:

1) окисно-абсорбційні методи – окислення NO проводиться в газовій фазі перед стадією абсорбції з використанням таких окисників, як O_2 , O_3 , Cl_2 , ClO_2 , Cl_2O , повітря, пари HNO_3 і т.п.;

2) абсорбційно-окисні методи – окисник дозується в сорбційний розчин; як окисники використовують $KBrO_3$, HNO_3 , $KMnO_4$, H_2O_2 , Na_2CrO_4 , $K_2Cr_2O_7$;

3) абсорбційно-відновні методи – використовуються сорбенти, що мають відновні властивості: до першої групи належать солі металів у хелатній формі, які здатні утворювати нітрозильні комплекси (Fe, Co, Ni, Cu, Mn, Sn, V та ін.), до другої – сполуки, що відновлюють NO_x до молекулярного азоту (NH_4OH , $(NH_4)_2CO$, $NaHSO_3$, $Na_2S_2O_3$ та ін.);

4) окисно-абсорбційно-відновні методи – проводиться попереднє окиснення NO в газовій фазі до оптимального співвідношення $NO / NO_2 = 1$, а далі використовуються відновники, які входять до складу сорбційного розчину.

При організації технології очищення газів від оксидів нітрогену в перших двох групах методів поглиначами виступають лужні розчини: KOH , $NaOH$, $Ca(OH)_2$, Na_2CO_3 , K_2CO_3 , $Ba(OH)_2$, $NaHCO_3$, $KHCO_3$, $MgCO_3$ та ін. Основними кінцевими продуктами є нітрити та нітрати. Ці процеси, як правило, відносяться до абсорбції без регенерації сорбенту, істотним недоліком яких є утворення відпрацьованих абсорбційних розчинів, що вимагають подальшої переробки.

Третя і четверта групи методів належать до абсорбції з регенерацією сорбенту, при умові його циркуляції по замкнутому контуру та виводі з системи продуктів абсорбції. Це більш перспективні способи, так як дозволяють або знешкодити оксиди нітрогену, або їх утилізувати у вигляді товарних продуктів, наприклад, добрив для сільського господарства, не створюючи масових стоків.

Загалом, абсорбційні методи дозволяють досягти достатньо високого ступеня очищення, який сягає 75–95 %, однак, обмеження їх застосування пояснюється складністю організації рідинних і газових потоків, громіздкістю апаратурного оформлення, високою енергоємністю.

2.4. Очищення газів від сульфур (IV) оксиду

Сульфур (IV) оксид – це безбарвний газ з характерним різким запахом, у високих дозах дуже токсичний. Характерними симптомами при отруєнні SO_2 є нежить, кашель, захриплість, сильне першіння у горлі та своєрідний присмак. Наявність його в повітрі у кількості $0,33 \text{ мг/дм}^3$ і більше викликає задишку і запалення легенів. Сульфур (IV) оксид відповідає 3-му класу небезпеки. Нормується наступними санітарно-гігієнічними показниками: $\text{ГДК}_{\text{м.р.}} = 0,5 \text{ мг/м}^3$, $\text{ГДК}_{\text{с.д.}} = 0,05 \text{ мг/м}^3$, $\text{ГДК}_{\text{р.з.}} = 10 \text{ мг/м}^3$. Також SO_2 відноситься до парникових газів непрямої дії і сприяє посиленню парникового ефекту та є одним із головних чинників утворення кислотних дощів [25].

У загальному випадку знизити викиди сполук сульфуру в атмосферу можна або шляхом видалення сірки з палива до його спалювання на спеціалізованих підприємствах, або шляхом очищення від сполук сульфуру продуктів згоряння палива та викидних технологічних газів.

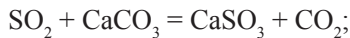
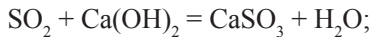
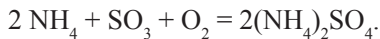
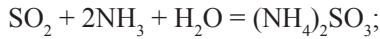
У теперішній час для очищення газових викидів від сульфур (IV) оксиду запропоновано багато методів [26], але на практиці застосовуються деякі з них. Зазвичай методи знешкодження класифікують за трьома основними ознаками:

- фізико-хімічною сутністю процесу: абсорбційні, адсорбційні, каталітичні та електронно-променеві;
- наявністю або відсутністю регенерації реагентів: циклічні (регенераційні), нециклічні (нерегенераційні). Циклічні методи дозволяють зменшити витрати реагентів і кількість відходів;
- можливістю утилізації продуктів процесу очищення: технології з одержанням товарного продукту і без нього. Одержання товарної продукції у вигляді елементарної сірки, рідинного SO_2 , сульфатної кислоти, будівельних матеріалів і мінеральних добрив дозволяє частково компенсувати витрати на очищення газових викидів.

Вибір методу знешкодження сульфур (IV) оксиду залежатиме від декількох факторів: концентрації SO_2 в газових викидах; температури і

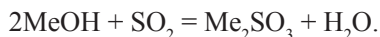
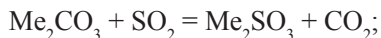
об'єму газів, що очищаються; необхідного ступеня очищення; властивостей, вартості і доступності реагентів і допоміжних матеріалів; наявності ринку збуту продукту утилізації тощо.

Найбільше розповсюдження отримали абсорбційні (мокрі) методи знешкодження SO_2 , засновані на поглинанні газів розчинами хемосорбентів в абсорберах різних типів і конструкцій. Як поглиначі можуть бути використані вода, водний аміак, розчини та суспензії лужних і лужноземельних металів (оксиди, гідроксиди, солі). Ці методи дозволяють перевести оксиди сульфуру в сульфіти, бісульфіти і сульфати. Ці процеси залежно від реагенту можуть бути представлені наступними рівняннями:



Преваги абсорбційних методів полягають у високому ступені очищення, простоті процесів і надійності роботи очисних установок. Істотним недоліком є насичення газів водяною парою і зниження їх температури після процесу очищення. Надалі, при викиданні парогазової суміші в атмосферу, водяна пара конденсується, і термічна підйомна сила газу зменшується. Це призводить до швидкого підвищення концентрації SO_2 біля джерела викиду. Також для більшості абсорбційних методів характерні корозія апаратури, порівняно громіздке обладнання та обмеження ринку збуту продуктів очищення [25].

Недоліки абсорбційних методів знешкодження сульфур (IV) оксиду призвели до розроблення адсорбційних (сухих) процесів, заснованих на використанні твердих поглиначів шляхом їх введення в порошкоподібному вигляді в топку і (або) газоходи теплоенергетичних агрегатів. Як адсорбенти можуть бути застосовані вапняк, доломіт або вапно, оксиди деяких металів (зокрема Mn і Al), силікагелі, кислотостійкі целіти (в тому числі природні). У загальному вигляді процес очищення описується такими реакціями:



Перевагою адсорбційних методів є можливість реалізації обробки газів при підвищених температурах без зволоження потоків, які очищуються. Це дозволяє знизити корозію апаратури, спрощує технологію знешкодження і скорочує капітальні витрати на неї. Поряд з цим сухі методи, зазвичай, передбачають можливість циклічного використання поглиначів і (або) утилізацію продуктів процесу очищення. До недоліків методу відносяться втрати адсорбенту за рахунок його стирання, унесення частинок поглиначів і необхідність його уловлювання, матеріальні витрати на процес регенерації сорбенту, необхідність утилізації тепла процесу очищення [25].

Більшість каталітичних методів знешкодження сульфур (IV) оксиду в газових викидах базуються на окисненні SO_2 в SO_3 на поверхні каталізатора з подальшим утворенням сульфатної кислоти. Процес може здійснюватися з використанням як каталізатора піролюзиту (MnO_2) або ванадію оксиду (V_2O_5). У першому випадку окиснення проводиться за допомогою кисню, в другому – за рахунок введення нітроген (IV) оксиду.

Каталітичний метод очищення є досить раціональним, так як не потребує великої кількості реагентів і дає можливість одержати товарний продукт – H_2SO_4 . Але суттєві його недоліки полягають в обмеженні використання каталізатора в умовах газового потоку, який містить пил, вологу та каталітичні отрути; високій вартості каталізатора; утворенні товарного продукту сумнівної якості за рахунок складності процесу кислотоутворення [25].

Особливе місце займає електронно-променевий (радіаційно-хімічний) метод одночасного очищення газів від оксидів сульфуру і нітрогену. Згідно цього методу газові викиди опромінюються потоком швидких електронів, що генеруються прискорювачем, в результаті чого утворюється невелика кількість активних компонентів (атомів і радикалів типу H, N, OH, HO_2 O та ін.). Вони поступово реагують з вихідними компонентами, перетворюючи їх на пари сульфатної і ні-

тратної кислот. Далі, при додаванні аміаку, відбувається зв'язування парів у тверді солі – амонію нітрат і амонію сульфат.

Електронно-променевиий метод дозволяє уникнути утворення рідинних відходів і шламів, повторного нагрівання газів, а також дозволяє одержати товарні продукти. Але цей спосіб вимагає обов'язкової наявності пристрою радіаційного захисту прискорювача електронів і реактора процесу очищення [25].

3. Висновки

Дослідження проблеми глобальної зміни клімату, викликаной значними викидами в атмосферне повітря парникових газів прямої і непрямой дії, дозволяють визначити ряд інструментів, які використовує Україна задля досягнення цілей Паризької угоди, а саме:

- розроблення та надала до Секретаріату Рамкової Конвенції ООН зі зміни клімату Стратегії низьковуглецевого розвитку України до 2050 року, яка передбачає скорочення викидів парникових газів, відмову від викопного палива і старт інвестування у відновлювальні джерела енергії;

- використання ставки екологічного податку на викиди карбон (IV) оксиду, який передбачений Податковим кодексом України з метою стимулювання підприємств до зменшення забруднення довкілля, а також наближення до ставок за викиди парникових газів у країнах ЄС;

- введення єдиної для всіх об'єктів економіки уніфікованої методики розрахунку об'ємів викидів парникових газів, що спрямовано на отримання достовірних даних про викиди парникових газів на рівні окремих підприємств та створення передумов для вибору ринкових та інших економічних важелів регулювання викидів парникових газів;

- екологізація виробничих процесів, яка пов'язана із розробкою і впровадженням ефективних способів знешкодження парникових газів у викидах промислових підприємств.

Вибір найбільш оптимального методу очищення газових викидів від небезпечних речовин буде здійснюватися залежно від наступних факторів: необхідного ступеня очищення та обсягу газу, що викидається; складу газових викидів відносно наявності водяної пари, газоподібних домішок і пилу; експлуатаційних властивостей застосованих матеріалів (летючості абсорбенту, міцності адсорбенту, активності,

селективності та термостійкості каталізатору, можливості їх регенерації); можливості утилізації продуктів процесу очищення; техніко-економічних показників обраного методу.

Список літератури:

1. IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. URL: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm.pdf>
2. Gleick P.H., Adams R.M., Amasino R.M. et al. (2010). Climate Change and the Integrity of Science. *Science*. 2010. Vol 328(5979). P. 689–690. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.328.5979.689>
3. Михайлова Є.О. Викиди парникових газів в Україні та світі. *Безпека людини у сучасних умовах* : збірник наук. статей та матеріалів VIII-ї Міжнар. наук.-метод. конф. та 115-ї Міжнар. конф. EAS (Харків, 8-9 грудня 2016 р.). Харків, 2016. С. 256–264.
4. IEA. *Global Energy & CO₂ Status Report*. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-co2-status-report-2019/emissions#abstract>
5. Михайлова Є.О., Панчева Г.М., Резніченко Г.М. Ефективні механізми поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Комунальне господарство міст*. 2019. Том 5. № 151. С. 37–44.
6. Михайлова Є.О., Протасенко О.Ф., Мороз М.О., Резніченко Г.М. Аналіз стану безпеки людини, довкілля та умов праці під час поводження з добривами. *Комунальне господарство міст*. 2021. Том 4. № 164. С. 203–214.
7. IPCC Second Assessment. *Climate Change 1995: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1995. URL: <https://archive.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>
8. Михайлова Є.О. Проблема глобальної зміни клімату для України та шляхи її вирішення. *Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика* : матеріали XIV міжнар. наук.-метод. конф. EAS (Харків, 21-22 травня 2015 р.). Харків, 2015. С. 87–89.
9. Іванюта С.П. Адаптація до змін клімату в Україні: проблеми і перспективи : Аналітична записка // Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <http://www.niss.gov.ua/articles/2223/>
10. Михайлова Є.О. Сучасні кроки України у вирішенні проблеми глобальної зміни клімату. *Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика* : збірник матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф. (Харків, 24 листопада 2016 р.). Харків, 2016. С. 183–184.
11. Уряд схвалив цілі кліматичної політики України до 2030 року. *Урядовий портал*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/uryad-shvaliv-cili-klimatichnoyi-politiki-ukrayini-do-2030-roku>

12. COP26. Україна пообіцяла відмовитись від вугілля на фоні його дефіциту і кризи в енергетиці. *BBC NEWS Україна*. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-59160285>
13. UNFCCC. *Status report of the annual inventory of Ukraine*. 2021. URL: <https://unfccc.int/documents/278854>
14. Griffin P.W., Hammond G.P., Norman J.B. Industrial energy use and carbon emissions reduction in the chemicals sector: A UK perspective. *Applied Energy*. 2018. Vol. 227. P. 587–602. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310255?via%3Dihub>
15. Кондрат Р.М., Серединський Д.Ю., Кондрат О.Р. Дослідження застосування вуглекислого газу для вилучення залишкової нафти з обводнених нафтових покладів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2(35). С. 26–30.
16. Михайлова Є.О., Панасенко В.О., Маркова Н.Б. Проблема викидів карбон (IV) оксиду та можливі шляхи її вирішення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. 2020. № 1(3). С. 80–88.
17. Товажнянський Л.Л., Лобойко О.Я., Гринь Г.І. та ін. *Технологія зв'язаного азоту*. Харків : НТУ «ХПІ», 2007. 536 с.
18. Yusuf A., Giwa A., Mohammed E.O., Mohammed O., Hajaj A.Al, Abu-Zahra M.R.M. CO₂ utilization from power plant: A comparative techno-economic assessment of soda ash production and scrubbing by monoethanolamine. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 237. P. 117760. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619326204?via%3Dihub>
19. Jongpitisub A., Siemanond K., Henni A. Simulation of Carbon-Dioxide-Capture Process using Aqueous Ammonia. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2015. Vol. 37. P. 1301–1306. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444635778500620?via%3Dihub>
20. Михайлова Є.О. Викиди карбон (II) оксиду та методи його знешкодження в умовах хімічних виробництв. *Сучасні технології у промисловому виробництві «СТПВ-2020»* : матеріали та програма VII Всеукр. наук.-техн. конф. (Суми, 21-24 квітня 2020 р.). Суми : Сумський державний університет, 2020. С. 228–229.
21. Thompson R.L., Lassaletta L., Patra P.K., Canadell J.G. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 993–998. URL: https://www.researchgate.net/publication/337337383_Acceleration_of_global_N2O_emissions_seen_from_two_decades_of_atmospheric_inversion
22. Михайлова Є.О. Можливі способи очищення газових викидів від оксидів нітрогену в умовах виробництва кальцинованої соди. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: збірник наук. статей XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 9-13 вересня 2019 р.). Харків, 2019. С. 227–231.
23. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. *Техника защиты окружающей среды*. Москва : Химия, 1989. 512 с.
24. Близнюк О.Н., Клещев Н.Ф., Огурцов А.Н. Оптимизация процесса селективного низкотемпературного восстановления N₂O аммиаком.

Модификация оксидной каталитической системы. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2013. № 3. С. 50–59.

25. Михайлова С.О. Аналіз методів знешкодження сульфур (IV) оксиду в газових викидах виробництва кальцинованої соди. *Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку* : збірник тез доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 25-26 жовтня 2018 р.). Херсон, 2018. С. 172–176.

26. Ефимов А.В., Цейтлин М.А., Гончаренко А.Л. и др. Технологические методы защиты окружающей среды от выбросов вредных соединений в энергетике и химическом производстве. Харьков : НТУ «ХПИ», 2017. 217 с.

References:

1. IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Available at: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm.pdf>

2. Gleick P.H., Adams R.M., Amasino R.M. et al. (2010) Climate Change and the Integrity of Science. *Science*, vol 328(5979), pp. 689–690. Available at: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.328.5979.689>

3. Mykhailova E.O. (2016) Vykydy parnykovykh haziv v Ukraini ta sviti [Greenhouse gas emissions in Ukraine and the world]. *Bezpeka lyudyny u suchasnykh umovakh*: VIII Mizhnar. nauk.-metod. konf. ta 115 Mizhnar. konf. EAS (Kharkiv, December 8-9, 2016). Kharkiv. (in Ukrainian)

4. IEA (2019) *Global Energy & CO₂ Status Report*. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-co2-status-report-2019/emissions#abstract>

5. Mykhailova E.O., Pancheva H.M., Reznichenko H.M. (2019) Efektyvni mekhanizmy povodzhennya z tverdymy pobutovymy vidkhodamy v Ukraini [Effective mechanisms of solid household waste management in Ukraine]. *Komunal'ne hospodarstvo mist – Municipal Economy of the cities*, vol 5(151), pp. 37–44. (in Ukrainian)

6. Mykhailova E.O., Protasenko O.F., Moroz M.O., Reznichenko H.M. (2021) Analiz stanu bezpeky lyudyny, dovkillya ta umov pratsi pid chas povodzhennya z dobryvamy [Analysis of the state of human safety, the environment and working conditions during fertilizer handling]. *Komunal'ne hospodarstvo mist – Municipal Economy of the cities*, vol. 4(164), pp. 203–214. (in Ukrainian)

7. IPCC Second Assessment (1995) *Climate Change 1995: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Available at: <https://archive.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>

8. Mykhailova E.O. (2015) Problema hlobal'noyi zminy klimatu dlya Ukrainy ta shlyakhy yiyi vyrishennya [The global climate change problem for Ukraine and its solve ways]. *Bezpeka zhytlya i diyal'nosti lyudyny – osvita, nauka, praktyka*: XIV mizhnar. nauk.-metod. konf. EAS (Kharkiv, May 21-22, 2015). Kharkiv. (in Ukrainian)

9. Ivanyuta S.P. (2016) *Adaptatsiya do zmin klimatu v Ukrayini: problemy i perspektyvy. Analitychna zapyska* [Adaptation to climate change in Ukraine: problems and prospects. Analytical note]. National Institute of Strategic Research. Department of energy and man-made safety. Available at: <http://www.niss.gov.ua/articles/2223/> (in Ukrainian)
10. Mykhailova E.O. (2016) Suchasni kroky Ukrayiny u vyrishenni problemy hlobal'noyi zminy klimatu [Ukraine's modern steps in solving global climate change problem]. *Problemy tekhnohenno-ekolohichnoyi bezpeky: osvita, nauka, praktyka*: Vseukr. nauk.-prakt. konf. (Kharkiv, November 24, 2016). Kharkiv. (in Ukrainian)
11. Uryad skhvalyv tsili klimatychnoyi polityky Ukrayiny do 2030 roku [The government approved the goals of Ukraine's climate policy until 2030]. *Government portal*. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/uryad-shvaliv-cili-klimatichnoyi-politiki-ukrayini-do-2030-roku> (in Ukrainian)
12. COP26. Ukrayina poobitsyala vidmovytys' vid vuhillya na foni yoho defytsytu i kryzy v enerhetytsi [Ukraine has promised to abandon coal against the background of its shortage and energy crisis]. *BBC NEWS Ukraine*. Available at: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-59160285> (in Ukrainian)
13. UNFCCC (2021) *Status report of the annual inventory of Ukraine*. Available at: <https://unfccc.int/documents/278854>
14. Griffin P.W., Hammond G.P., Norman J.B. (2018) Industrial energy use and carbon emissions reduction in the chemicals sector: A UK perspective. *Applied Energy*, vol. 227, pp. 587–602. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310255?via%3Dihub>
15. Kondrat R.M., Seredynskyy D.Y., Kondrat O.R. (2010) Doslidzhennya zastosuvannya vuhlekysloho hazu dlya vyluchennya zalyshkovoyi nafty z obvodnenykh naftovykh pokladiv [Research on the carbon dioxide use to extract residual oil from watered oil deposits]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysheh – Exploration and development of oil and gas fields*, vol. 2(35), pp. 26–30. (in Ukrainian)
16. Mykhailova E.O., Panasenko V.O., Markova N.B. (2020) Problema vykydiv karbon (IV) oksydu ta mozhlyvi shlyakhy yiyi vyrishennya [The problem of carbon (IV) oxide emissions and possible solutions]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, vol. 1(3), pp. 80–88. (in Ukrainian)
17. Tovazhnyansky L.L., Loboiko O.Ya., Hryn G.I. etc. (2007) *Tekhnolohiya zv'yazanoho azotu* [Technology of bound nitrogen]. Kharkiv: NTU "KhPI". (in Ukrainian)
18. Yusuf A., Giwa A., Mohammed E.O., Mohammed O., Hajaj A.A.I, Abu-Zahra M.R.M. (2019) CO₂ utilization from power plant: A comparative techno-economic assessment of soda ash production and scrubbing by monoethanolamine. *Journal of Cleaner Production*, vol. 237, p. 117760. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619326204?via%3Dihub>
19. Jongpitisub A., Siemanond K., Henni A. (2015) Simulation of Carbon-Dioxide-Capture Process using Aqueous Ammonia. *Computer Aided Chemical*

Engineering, vol. 37, pp. 1301–1306. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444635778500620?via%3Dihub>

20. Mykhailova E.O. (2020) Vykydy karbon (II) oksydu ta metody yoho znezhkodzhennya v umovakh khimichnykh vyrobnytstv [Carbon (II) oxide emissions and methods of its disposal in the conditions of chemical manufactures]. *Suchasni tekhnolohiyi u promyslovomu vyrobnytstvi "STPV-2020"*: VII Vseukr. nauk.-tekhn. konf. (Sumy, April 21-24, 2020). Sumy. (in Ukrainian)

21. Thompson R.L., Lassaletta L., Patra P. K. & Canadell J. G. (2019) Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nature Climate Change*, vol. 9, pp. 993–998. Available at: https://www.researchgate.net/publication/337337383_Acceleration_of_global_N2O_emissions_seen_from_two_decades_of_atmospheric_inversion

22. Mykhailova E.O. (2019) Mozhlyvi sposoby ochyshchennya hazovykh vykydiv vid oksydiv nitrohenu v umovakh vyrobnytstva kal'tsynovanoyi sody [Possible methods of cleaning gas emissions from nitrogen oxides in the conditions of soda ash manufacture]. *Ekolohichna bezpeka: problemy i shlyakhy vyrishennya*: XV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (Kharkiv, September 9-13, 2019). Kharkiv. (in Ukrainian)

23. Rodionov A.I., Klushin V.N., Torocheshnikov N.S. (1989) *Tekhnika zashchity okruzhayushchey srody* [Environmental protection technology]. Moscow: Chemistry. (in Russian)

24. Bliznyuk O.N., Kleshchev N.F., Ogurtsov A.N. (2013) Optimizatsiya protsessa selektivnogo nizkotemperaturnogo vosstanovleniya N₂O ammiakom. Modifikatsiya oksidnoy kataliticheskoy sistemy [Optimization of the process of selective low-temperature reduction of N₂O with ammonia. Modification of the oxide catalytic system]. *Integrovani tekhnologii ta yenergozberezhennya – Integration technologies and energy saving*, no. 3, pp. 50–59. (in Russian)

25. Mykhailova E.O. (2018) Analiz metodiv znezhkodzhennya sul'fur (IV) oksydu v hazovykh vykydakh vyrobnytstva kal'tsynovanoyi sody [Analysis of sulfur (IV) oxide disposal methods in gas emissions from soda ash manufacture]. *Ekolohichni problemy navkolyshn'oho seredovyshcha ta ratsional'noho pryrodokorystuvannya v konteksti staloho rozvytku*: Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (Kherson, October 25-26, 2018). Kherson. (in Ukrainian)

26. Efimov A.V., Zeitlin M.A., Goncharenko A.L. etc. (2017) *Tekhnologicheskiye metody zashchity okruzhayushchey srody ot vybrosov vrednykh soyedineniy v energetike i khimicheskoy proizvodstve* [Technological methods of protecting the environment from emissions of harmful compounds in the energy sector and chemical production]. Kharkov: NTU "KhPI". (in Russian)