

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ЕМІСІЙ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ВІД ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ПОЛЬЩИ

Summary. The main GHG emission sources in IPCC subsector Chemistry of Industrial sector in Poland are analyzed. Using developed mathematical models and created geoinformation technology, emissions of methane, nitrous oxide and carbon dioxide from production of chemicals are assessed. Results of GHG spatial inventory are presented as digital maps at the voivodeships' level.

Keywords: mathematical modeling, greenhouse gas emission, spatial inventory, chemistry, Poland.

Анотація. Проаналізовано основні джерела емісії парникових газів у підсекторі "Хімічна промисловість" промислового сектору. З використанням розроблених математичних моделей та створеної геоінформаційної технології здійснено оцінювання емісій метану, закису азоту та вуглекислого газу від виробництва хімічних речовин. Результати просторової інвентаризації парникових газів представлено у вигляді цифрових карт на рівні воєводств.

Ключові слова: математичне моделювання, емісія парникових газів, просторова інвентаризація, хімічна промисловість, Польща.

Вступ. Останні чверть століття людство все більше замислюється над змінами клімату. Науковці стверджують, що однією з основних причин кліматичних змін є високий рівень концентрації парникових газів у атмосфері внаслідок різних видів людської діяльності.

На міжнародному рівні прийнято зобов'язання щодо здійснення країнами національних інвентаризацій парникових газів для основних секторів економіки (енергетики, промисловості, аграрного сектору та лісового господарства) з метою стабілізації рівня концентрації цих газів у атмосфері планети. У зв'язку з цим оцінювання емісій парникових газів є першочерговою проблемою при перевірці виконання міжнародних зобов'язань щодо скорочення рівня викидів. Міжурядовою групою експертів з питань зміни клімату розроблено відповідні методики інвентаризації парникових газів на загальнодержавному рівні [1]. Перевагою таких методик є їх універсальність та можливість застосування до різних країн, проте вони дають надто узагальнені результати. Для окремо взятої країни можна проводити інвентаризацію на рівні регіонів, що дає можливість отримати детальніші результати, ніж для країни загалом, проте ці результати все ще є зосередженими. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні додаткової

¹ Національний університет "Львівська політехніка"

² Академія бізнесу в м. Домброва Гурніча, Польща

просторової інвентаризації, яка б давала можливість оцінити питомі емісії парникових газів (віднесені до одиниці площі) на як завгодно малих ділянках та здійснити її просторовий аналіз.

Відповідно до міжнародної класифікації джерел емісій парникових газів промисловий сектор поділяється на п'ять підсекторів, серед яких вагома частка належить виробництву хімічних речовин. Просторова інвентаризація парникових газів для промислового сектору Польщі, зокрема хімічної промисловості, досі не проводилася. Тому метою цієї роботи є представлення підходів до просторового моделювання процесів емісії парникових газів від хімічної промисловості Польщі.

У хімічній промисловості розглядають низку категорій: виробництво аміаку, нітратної кислоти, карбідів, капролактаму, технічного вуглецю, етилену, метанолу, стиролу тощо. Результати інвентаризації парникових газів для Польщі загалом представлено у річних національних звітах. У процесі виробництва хімічних речовин в атмосферу емітується значна кількість вуглекислого газу (CO_2), метану (CH_4) та закису азоту (N_2O). За даними польського національного звіту з інвентаризації за 2012 рік [2] частка хімічної промисловості в сукупних емісіях у CO_2 -еквіваленті у промисловому секторі становила 16,9%. Хімічна промисловість є одним із основних емітентів закису азоту N_2O , її частка становить 4,3% в 2010 році від сукупних емісій по всіх секторах і зменшилася на 8,1% порівняно з базовим 1988 роком, а частка в емісіях CO_2 та CH_4 від сукупних емісій у цьому ж році – 1,09% та 0,69%, відповідно.

Математичні моделі емісійних процесів. Підхід до просторової інвентаризації парникових газів полягає у поділі досліджуваної території на елементарні ділянки та почерговому оцінюванні емісій для кожної з них. Процесам емісії парникових газів від хімічної промислової діяльності поставлено у відповідність загальну математичну модель:

$$E_{Chem}^g(\delta) = \sum_{i=1}^I D_i(\delta) \cdot K_i^g(\delta), \quad (1)$$

де E_{Chem}^g – річні емісії g -го парникового газу від хімічних промислових процесів у δ -й елементарній ділянці; D_i – статистичні дані щодо виробництва основних хімічних речовин у межах цієї ділянки; K_i^g – коефіцієнт емісії g -го парникового газу від i -го типу джерела емісії у цій ділянці; I – кількість категорій джерел емісії у хімічній промисловості.

Виробництво аміаку (NH_3) є лідером у плані емісій серед категорій хімічної промисловості Польщі з часткою 76% [2] і представлено п'ятьма великими підприємствами: Anwil S.A. (група PKN Orlen), Zakłady Azotowe Puławy S.A., Zakłady Chemiczne Police S.A., Zakłady Azotowe Kedzierzyn S.A. та Zakłady Azotowe w Tarnowie-Mościcach S.A. із загальною річною виробничою потужністю понад 2,1 млн.т аміаку. Усі згадані вище

підприємства в ролі сировини для виробництва аміаку використовують природний газ, а у процесі виробництва виділяються CO_2 та CH_4 .

Математичні моделі емісійних процесів від виробництва аміаку мають такий вигляд:

$$E_{Am}^{\text{CO}_2}(\zeta_r) = \frac{44}{12} \cdot F_{Am}(\zeta_r) \cdot D_{FR} \cdot K_{CCF} \cdot K_{COF}, \quad (2)$$

$$E_{Am}^{\text{CH}_4}(\zeta_r) = F_{Am}(\zeta_r) \cdot K_{Am}^{\text{CH}_4}, \quad \zeta_r \in \Xi_{\text{Ammonia}}, r = \overline{1, R},$$

де $E_{Am}^{\text{CO}_2}$ – річні емісії вуглекислого газу від ζ_r -го підприємства з виробництва аміаку; F_{Am} – статистичні дані щодо обсягів виробництва аміаку ζ_r -м підприємством; D_{FR} – потреба в паливі на одиницю продукції; K_{CCF} – вміст вуглецю в паливі; K_{COF} – коефіцієнт окислення вуглецю палива; Ξ_{Ammonia} – множина підприємств з виробництва аміаку; R – кількість таких підприємств; $E_{Am}^{\text{CH}_4}$ – річні емісії метану від ζ_r -го підприємства; $K_{Am}^{\text{CH}_4}$ – коефіцієнт емісії метану для аміаку.

Статистичну інформацію щодо обсягів виробництва аміаку використано зі щорічника за результатами промислової діяльності Польщі у 2010 році [3]. З паливно-енергетичної статистики за 2010-2011 роки [4] оцінено витрати енергії з палива (природного газу) на виробництво тонни продукції аміаку. Коефіцієнт вмісту вуглецю в природному газі та коефіцієнт його окислення використано з національних методик інвентаризації [1], а коефіцієнт емісії метану – з національного звіту і він становить 4,9 кг CH_4 на тонну NH_3 .

Виробництво нітратної (азотної) кислоти є одним з основних джерел емісій закису азоту в хімічній промисловості. Наприклад, станом на 2009 рік ця категорія з часткою в 21% була найбільшим джерелом емісії CO_2 у хімічній промисловості ЄС, в той час як виробництво аміаку – майже 16%. Нітратну кислоту отримують реакцією окислення аміаку (процес “Освальд”). Зазвичай підприємства на одному і тому ж заводі виробляють аміак і на його основі – нітратну кислоту. Тільки одне підприємство з п’яти, що виробляють аміак, а саме Zakłady Chemiczne Police S.A., не виробляє нітратну кислоту. Сумарна річна виробнича потужність підприємств становить близько 2 млн.т нітратної кислоти. У період з 2008 по 2012 роки на польських підприємствах з виробництва нітратної кислоти реалізовувалися ЛІ-проекти, основною метою яких було зниження поточного рівня емісій закису азоту N_2O шляхом встановлення вторинного каталізатора розкладу цього газу всередині кожного з реакторів окислення (спалювання) аміаку [5].

Процесам емісії закису азоту від виробництва нітратної кислоти поставлено у відповідність математичну модель, що має такий вигляд:

$$E_{NA}^{\text{N}_2\text{O}}(\zeta_m) = F_{NA}(\zeta_m) \cdot K_{NA}^{\text{N}_2\text{O}}(\zeta_m), \quad \zeta_m \in \Xi_{\text{NitricAcid}}, m = \overline{1, M}, \quad (3)$$

де $E_{NA}^{N_2O}$ – річні емісії закису азоту від ζ_m -го підприємства з виробництва нітратної кислоти; F_{NA} – статистичні дані щодо обсягів виробництва нітратної кислоти (за рік) для цього підприємства; $K_{NA}^{N_2O}$ – специфічний коефіцієнт емісії закису азоту для нітратної кислоти для цього підприємства; $\Xi_{NitricAcid}$ – множина підприємств з виробництва нітратної кислоти; M – їх кількість.

Дані про обсяги виробництва нітратної кислоти у 2002-2011 роках відомі на рівні країни з даних Центрального статистичного управління Польщі [3]. Для потреб моделювання емісійних процесів обсяги виробництва нітратної кислоти розподілили пропорційно до потужності підприємств (табл. 1).

Таблиця 1

Виробнича потужність та коефіцієнти емісії закису азоту для підприємств з виробництва нітратної кислоти

Підприємство	Потужність, тонни/рік	Коефіцієнт емісії, кг N ₂ O/ тонну HNO ₃
Zakłady Azotowe w Tarnowie-Mościcach S.A.	277566	1,75
ZAK S.A.	174900	1,05
Zakłady Azotowe Pulawy S.A.	891000	1,40
Anwil S.A.	722700	1,20

З польського національного звіту з інвентаризації відомо, що виробництво адипінової кислоти здійснювалося тільки до 1994 року. У зв'язку з цим ця категорія джерел емісій не розглядалася.

Виробництво карбідів – сполук вуглецю з металами та неметалами – супроводжується емісіями вуглекислого газу CO₂. Карбіди широко застосовують для виробництва металокерамічних і вилитих твердих сплавів; металообробки, буріння гірських порід тощо. Важливе практичне значення має карбід кальцію CaC₂. Його отримують нагріванням вапняку (CaCO₃) з подальшим відновленням оксиду кальцію (CaO) за допомогою вуглецю (C), наприклад, вуглецю в нафтовому коксі. У Польщі виробництвом карбідів, а саме карбіду кальцію, займається тільки одне підприємство Huta Laziska S.A.

Статистичну інформацію про обсяги виробництва карбіду кальцію у 2010 році отримали з [3]. Коефіцієнт емісії, що становить 2190 кг CO₂ на тону карбіду, використано з традиційних методик інвентаризації [1].

Виробництво інших хімічних речовин. Емісії парникових газів від виробництва капролактаму, метанолу, етилену, стиролу, технічного вуглецю розглядаються в категорії “Інші хімічні речовини”. Капролактаму є штучно синтезованим полімером, весь його обсяг використовується для виробництва б-нейлону, з якого виготовляють волокна та пластмаси. Два підприємства

Zakłady Azotowe Puławy S.A. та Zakłady Azotowe w Tarnowie-Mościcach S.A. є його виробниками і на сьогодні Польща є другою у Східній Європі з виробничою потужністю підприємств у 70 та 86 тис. тон, відповідно. За присутності газоподібного аміаку в ролі сировини при виробництві капролактаму відбуваються емісії закису азоту N₂O.

Широкого застосування у промисловому виробництві гум та пластмас набув технічний вуглець, що утворюється при неповному згоранні важких нафтопродуктів. До 2009 року в Польщі функціонувало два підприємства з його виробництва: CARBON BLACK Polska Sp. z o.o. та Carbochem Gliwickie Zakłady Chemiczne, проте останнє збанкрутувало в 2010 році. Процес виробництва технічного вуглецю супроводжується емісіями вуглекислого газу CO₂.

Виробництво етилену відбувається методом парового крекінгу нафти (основний процес) або етану, пропану, бутану, газоліну. У процесі його виробництва утворюються важливі вторинні продукти: пропілен та бутадієн. З етилену виробляють етилендихлорид, оксид етилену та поліетилен. У Польщі є тільки одне підприємство з виробництва етилену – Polski Koncern Naftowy Orlen S.A. (Plock) з річною виробничою потужністю у 700 тис.т. Основними парниковими газами, що утворюються у процесі виробництва є вуглекислий газ та метан. Виробництво стиролу характеризується незначними емісіями метану, тим не менш цю категорію потрібно брати до уваги. Відомо, що в Польщі є один великий виробник стиролу та його полімерів – підприємство Synthos Dwory Sp.z o.o. Метанол застосовується для різних цілей, серед яких найбільша його кількість використовується при виробництві формальдегіду, менше у лакофарбовій промисловості і як паливо у високофорсованих двигунах внутрішнього згорання.

Математична модель емісійних процесів від виробництва цих речовин має такий вигляд:

$$E_{Other}^{CO_2} = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \left[D_j(\zeta_{O,n_j}) \cdot K_j^g(\zeta_{O,n_j}) \cdot K_{GWP}^{g,CO_2} \right] \quad \zeta_{O,n_j} \in \Xi_{Other}, \quad n_j = \overline{1, N_j}, \quad (4)$$

де $E_{Other}^{CO_2}$ – сумарні річні емісії в CO₂-еквіваленті від усіх підприємств з виробництва капролактаму, технічного вуглецю, етилену та стиролу; D_j – статистичні дані про обсяги виробництва хімічної речовини j -го типу на ζ_{O,n_j} -му підприємстві; K_j^g – коефіцієнт емісії g -го парникового газу від виробництва хімічної речовини j -го типу на цьому підприємстві; K_{GWP}^{g,CO_2} – коефіцієнт глобального потепління для g -го парникового газу; J – кількість різних аналізованих хімічних речовин; N – кількість підприємств з виробництва хімічної речовини j -го типу; Ξ_{Other} – множина всіх підприємств.

Статистичні дані про обсяги виробництва 6-гексанолактаму опубліковано у щорічнику [3]. Коефіцієнт емісії використано зі звіту [2] і він становить 4,74

кг N_2O на тону NO/NO_2 . Обсяги виробленого технічного вуглецю розраховано за даними про сукупні та питомі витрати енергії на його виробництво, отримані з [4]. Коефіцієнт емісії для технічного вуглецю також використано з національного звіту з інвентаризації за 2012 рік [2] і він становить 11 кг CH_4 на тону продукції вуглецю. Дані про виробництво основних нафтохімічних речовин, зокрема етилену, на підприємстві PKN Orlen у 2010 році подано у щорічному звіті компанії за 2011 рік. Специфічний національний коефіцієнт емісії становить 0,3 кг CO_2 /тону етилену і значно менший від коефіцієнта, поданого в методиках [1]. Коефіцієнти емісії метану від виробництва етилену та стиролу використано з традиційних методик інвентаризації [1] і вони становлять 1 кг CH_4 /тону етилену та 4 кг CH_4 /тону стиролу, відповідно. Відсутня статистична інформація про обсяги виробництва стиролу, натомість відомі обсяги продукції його полімерів [3].

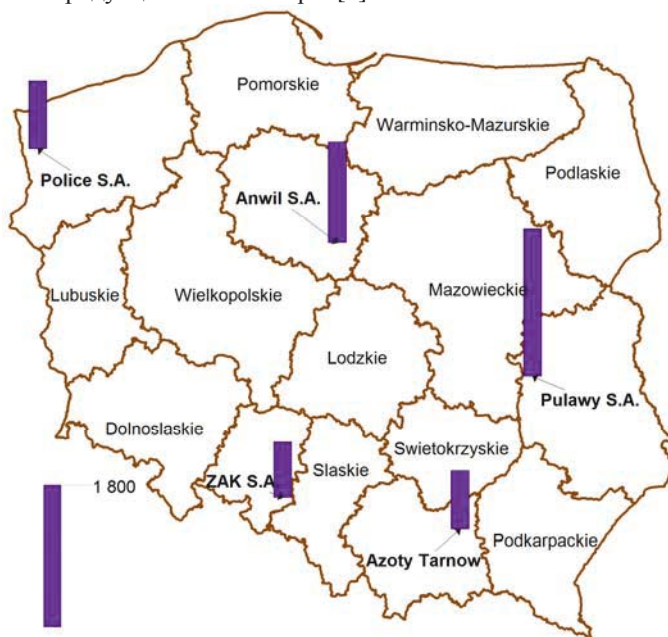


Рис. 1. Емісії вуглекислого газу (CO_2) від виробництва аміаку на рівні підприємств (тис. тон, 2010 р.)

Кадастр емісій парникових газів для основних категорій хімічної промисловості. З використанням розроблених математичних моделей (1)-(4) та геоінформаційних технологій побудовано просторові кадастри емісії парникових газів для всіх категорій джерел у хімічній промисловості. Як приклад, на рис. 1 представлено цифрову карту емісій вуглекислого газу від виробництва аміаку на 5-ти підприємствах, для відображення результатів використано карту меж воєводств Польщі.

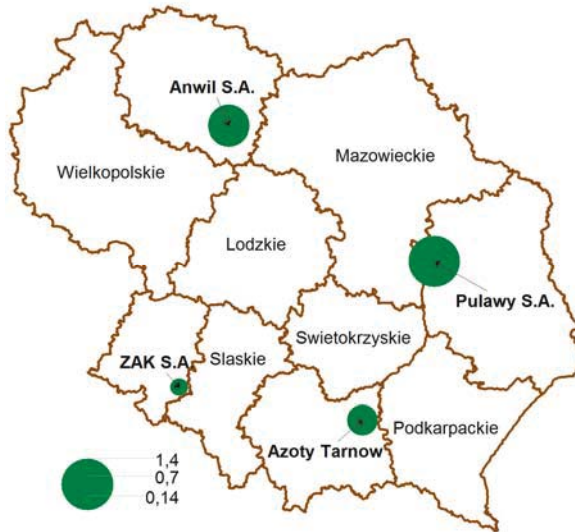


Рис. 2. Просторовий розподіл емісій закису азоту (N_2O) від виробництва нітратної кислоти по підприємствах (тис. тон, 2010 р.)

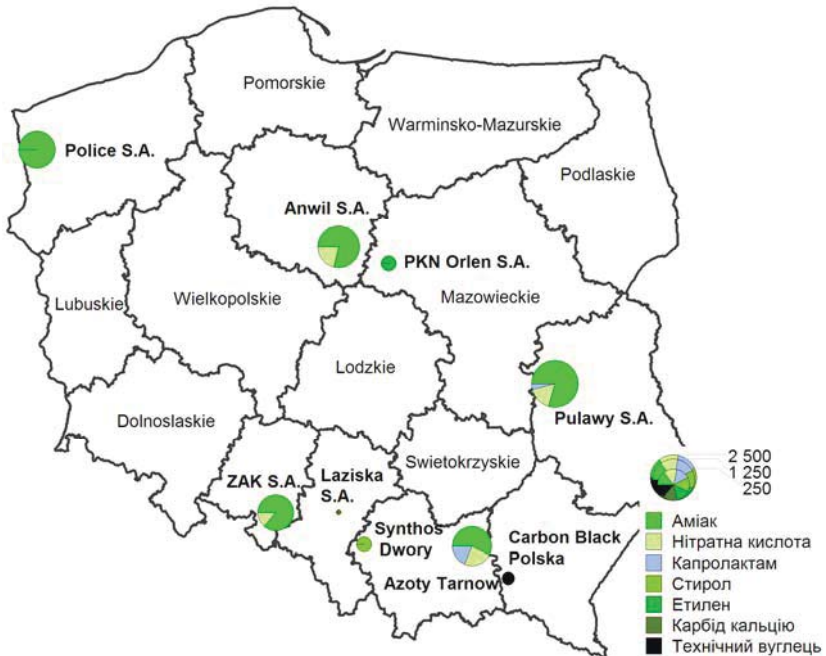


Рис. 3. Сумарні емісії в CO_2 -еквіваленті від виробництва основних хімічних речовин (тис. тон, 2010 р.)

На рис. 2 проілюстровано емісії закису азоту від виробництва нітратної кислоти в розрізі підприємств. Парникові гази CO_2 , CH_4 , N_2O характеризуються коефіцієнтами глобального потепління, які становлять, відповідно, 1, 25 та 298 одиниць відносно вугле кислого газу CO_2 . Ці коефіцієнти використано для оцінювання сукупних емісій в CO_2 -еквіваленті від хімічної провислості Польщі (рис. 3). Лідером щодо емісій серед підприємств є Zakłady Azotowe Puławy S.A. (2,4 млн.т) за рахунок найбільших виробничих потужностей його заводських ліній.

Висновки. Розроблено математичні моделі процесів емісії парникових газів від виробництва основних хімічних речовин у Польщі, які реалізовано у спеціалізованій геоінформаційній системі. Показано 9 найвпливовіших хімічних заводів за обсягом максимальних емісій антропогенних парникових газів. У результаті чисельних експериментів отримано оцінки емісій вуглекислого газу, метану та закису азоту у розрізі категорій джерел емісій на рівні окремих підприємств та вєводств у цілому. Процеси виробництва аміаку спричиняють 78,2% сукупних емісій парникових газів у хімічній промисловості, виробництво нітратної кислоти – 16,8%, карбідів – лише 0,04%, а для решти хімічних речовин (капролактаму, технічного вуглецю, етилену та стиролу разом) ця частка становить 4,9%. Здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів з тими, що їх подано на рівні країни у національному звіті. Результати інвентаризації, представлені на побудованих цифрових картах, відображають регіональну специфіку процесів емісії парникових газів у Польщі і є важливими для владних структур при прийнятті стратегічних рішень щодо шляхів скорочення емісій на відповідних територіях. Роботи виконано в рамках проекту 7FP Marie Curie Actions IRSES project No. 247645.

1. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Том 3 : Промышленные процессы и использование продуктов. Глава 3: Выбросы химической промышленности. МГЭИК, 2006
2. Poland's National Inventory report 2012: Greenhouse Gas Inventory for 1988-2010. National Centre for Emission Management at the Institute of Environmental Protection. National Research Institute, Warszawa, May 2012.
3. Produkcja wyrobów przemysłowych w 2010 r. – GUS, 2012 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.stat.gov.pl/gus/przemysl_bud_PLK_HTML.htm
4. Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2010, 2011. – GUS, 2012. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.stat.gov.pl/gus/5840_3674_ENG_HTML.htm
5. Catalytic Reduction of N_2O inside the Ammonia Burners of the Nitric Acid Plant in Puławy, Poland. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ji.unfccc.int/JIITLProject/DB/6VTBRQ9M9XN56P7WWBTIOZOWQC5OZQ/details>

Поступила 2.9.2013р.