

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ВІД ВИКОРИСТАННЯ ВИКОПНОГО ПАЛИВА У МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ ПОЛЬЩІ

Summary. Mathematical models for the spatial analysis of the processes of greenhouse gases emission from the burning of fossil fuels in the metallurgy industry in Poland were created. GIS technology, which makes it possible to form a geo - distributed database and build the spatial emission inventories of greenhouse gas emissions in the metallurgy sector of industry in Poland was improved. The results were represented as math model and map.

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

Анотація. Розроблено математичні моделі для просторового аналізу процесів емісії парникових газів, які виникають внаслідок спалювання викопного палива у металургійній промисловості Польщі. Удосконалено геоінформаційну технологію, яка дає можливість формувати георозподілену базу даних емісій та будувати просторові кадастри емісій парникових газів у металургійному секторі промисловості Польщі. Результати представлення за допомогою математичної моделі і карт.

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

Вступ. Глобальна зміна клімату – одна з найбільш обговорюваних проблем сьогодення. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є зменшення концентрації парникових газів у атмосфері. Для цього було підписано низку міжнародних угод, які встановлюють певні обмеження перед країнами щодо емісій парникових газів. Оцінювання таких емісій є першочерговою проблемою при перевірці виконання міжнародних зобов'язань щодо скорочення рівня викидів. Саме тому було розроблено ряд методик для оцінювання емісій у різних секторах економічної діяльності.

Традиційні методи інвентаризації парникових газів спрямовані на обчислення емісій на рівні країни, що є необхідним для дотримання міжнародних зобов'язань. Але для кожної окремо взятої країни доцільно мати інформацію про емісії парникових газів на більш детальному рівні і з врахування особливостей структури та способу використання викопного палива. Саме тому необхідною є реалізація просторово розподіленої інвентаризації на детальнішому просторовому рівні, яка б давала можливість

¹ Національний університет "Львівська політехніка"

² Академія бізнесу в м.Домброва Гурніча, Польща

використовувати специфічні коефіцієнти емісії для конкретних підприємств чи заводів. Так, у працях [1, 2] представлено розроблені підходи для просторової інвентаризації у секторі «Переробна промисловість» у Львівській області.

Відповідно до класифікації Міжнародної групи експертів зі зміни клімату [3] джерела емісій парникових газів промислового сектору, які виникають від спалювання викопного палива, поділяють на чотири підсектори, серед яких вагома частка належить металургії (згідно з інвентаризаційними звітами Польщі [4] емісії металургійного сектору становлять 21% від всіх емісій промисловості). Просторова інвентаризація емісій парникових газів для промислового сектору Польщі, зокрема металургійної промисловості, досі не здійснювалась. Тому метою цієї роботи є удосконалення математичних моделей та розроблення геоінформаційної технології для здійснення відповідних обчислювальних експериментів для металургійного сектору Польщі.

Опис об'єкту дослідження. При оцінюванні емісій парникових газів у металургійній промисловості слід враховувати те, що це енерго- і матеріалозатратне виробництво. Економічно не вигідно виробляти цей тип продукції на території, де відсутня сировинна база.

Металургійний комплекс Польщі представлений чорною і кольоровою металургією. Чорна металургія розвинута в Сілезькому і Малопольському воеводствах (агломерація Домброва Гурніча, Катовіце, Ченстохова). Високоякісна сталь виплавляється також у Варшаві. На території Польщі розташовано більше 20 металургійних заводів, серед яких 10 найбільших, які виробляють майже 80% всієї металургійної продукції країни. Велика корпорація ArselorMittal включає в себе 4 найбільші заводи – Huta Celder (входить в 70 найбільших металургійних заводів світу), Huta Florian, Huta im. Sendzimir та Huta Katowice.

Серед галузей кольорової металургії виділяється мідна промисловість. Виробництво концентрується у трикутнику Легніца-Жуковиці-Орск (Нижньої Сілезії). Свинець і цинк виплавляють у Катовіцах та інших промислових центрах Верхньої Сілезії. Для виробництва кольорових металів в основному споживається менше палива, але більша кількість електроенергії.

Математичні моделі емісійних процесів. При побудові георозподілених кадастрів емісії парникових газів металургійні заводи представляємо як площинні джерела, оскільки площа деяких заводів може перевищувати десятки квадратних кілометрів.

За допомогою плагіну Google-Earth було визначено розташування найбільших металургійних заводів Польщі (рис. 1,а). Для створення карти джерел емісії парникових газів у металургійному секторі використовувалась карта землекористування, з якої було виділено промислові об'єкти (рис. 1,б). Наступним кроком при підготовці карти джерел емісії у металургійному секторі було визначення за допомогою програмного модуля розташування промислових об'єктів, які відповідають металургійним заводам (рис. 2).

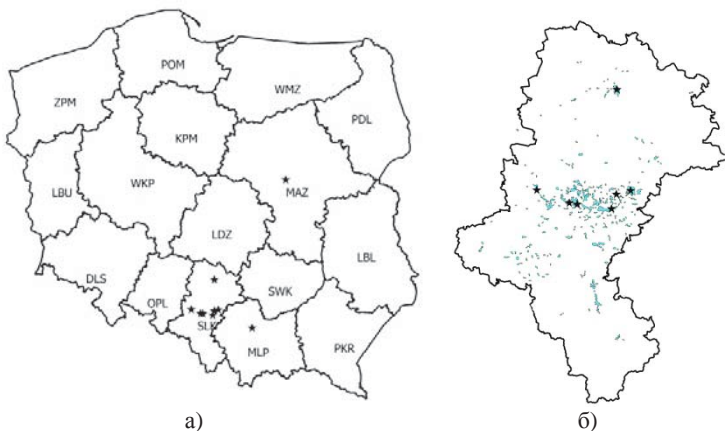


Рис. 1. Цифрова карта джерел емісії парникових газів у металургійному секторі Польщі: розміщення найбільших металургійних заводів (а); промислові об'єкти Сілезького воєводства (б)

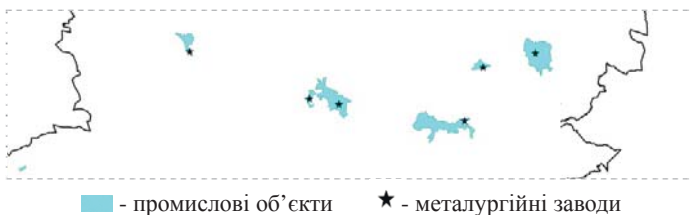


Рис. 2. Фрагмент цифрової карти найбільших металургійних заводів, як площинних джерел емісії

Знаходження розташування усіх заводів металургійної промисловості є досить трудомістким завданням, а інформація про кількість спожитого на конкретному заводі палива є статистичною таємницею. Тому було зроблено низку припущень при створенні математичного опису процесу емісії парникових газів у цьому секторі.

З метою побудови математичної моделі емісійних процесів у досліджуваній галузі зручно ввести ряд позначень: $w = \overline{1, W}$ – номер воєводства, де W – число воєводств $W = 16$; $r_w = \overline{1, R_w}$ – номер під регіону у w -му воєводстві, де R_w – число таких під регіонів; $n_{ind}(j_{w,r_w})$ – елементарна ділянка (промислова зона) на карті землекористування Польщі з номером $j_{w,r_w} = \overline{1, J_{w,r_w}}$, де J_{w,r_w} – число таких об'єктів у r_w -му під регіоні w -го воєводства; ξ_{metal, n_m} – n_m -те велике металургійне підприємство, потужності чи обсяги виробництва якого є відомі, $n_m = \overline{1, N_m}$, де N_m – число таких

підприємств. Тоді математичну модель емісійних процесів у досліджуваній категорії можна представити у вигляді:

$$E_{metal}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})] = D_{stat,metal}^f \cdot K_{metal}^f[\eta_{ind}(j_{w,r_w})] \cdot K_{em,metal}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})],$$

$$j_{w,r_w} = \overline{1, J_{w,r_w}}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W},$$

де $E_{metal}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ – річні емісії g -го парникового газу, які виникають внаслідок спалювання викопного палива f -го виду в елементарному об'єкті $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$, причому на території деяких з цих об'єктів розміщені великі металургійні підприємства, потужності чи обсяги виробництва яких є відомі, а на території інших об'єктів є менші підприємства, потужності виробництва яких є невідомі; g – перерахункова змінна, яка означає парниковий газ, $g \in \{CO_2, N_2O, CH_4\}$; $D_{stat,metal}^f$ – загальнонаціональні статистичні дані про використання палива f -го виду на виробництво металу; $K_{metal}^f[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ – дезагрегаційний коефіцієнт для використаного f -го виду палива для об'єкту $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$; $K_{em,metal}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ – коефіцієнт емісії g -го парникового газу від спалювання f -го виду палива на потреби металургійної промисловості на території об'єкту $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$.

Дезагрегаційний коефіцієнт $K_{metal}^f[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ залежить від доступної інформації про виробництво різних видів металу, його можна записати у такому вигляді:

а) для промислової зони, в якій розміщений один з 10 найбільших металургійних заводів, що виробляють 80 % від усієї металургійної продукції Польщі:

$$K_{metal}^f[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]_{\eta_{ind}(j_{w,r_w}) \cap \xi_{n_m} \neq \emptyset; n_m = \overline{1, N_m}} = 0,8 \cdot \frac{V_{metal}(\xi_{n_m})}{\sum_{l=1}^{N_m} V_{metal}(\xi_l)},$$

$$j_{w,r_w} = \overline{1, J_{w,r_w}}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W},$$

де $V_{metal}(\xi_{n_m})$ – потужності виробництва n_m -го металургійного заводу ξ_{metal, n_m} ; \cap – операція, яка визначає спільну територію двох географічних об'єктів $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$ та ξ_{metal, n_m} ;

б) для промислових об'єктів, потужності виробництва яких невідомі:

$$K_{metal}^f[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]_{[\eta_{ind}(j_{w,r_w})] \cap \xi_{n_m} = \emptyset; \forall n_m = \overline{1, N_m}} =$$

$$= 0,2 \cdot K_{\%, metal, w} \cdot \frac{GVA_{r_w}}{\sum_{q=1}^{R_w} GVA_q} \cdot \frac{S(j_{w,r_w})}{\sum_{i=1}^{J_{w,r_w}} S(j_{w,i})},$$

$$j_{w,r_w} = \overline{1, J_{w,r_w}}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W},$$

де $K_{\%,metal,w}$ – частка металургійної продукції w -го воєводства від цієї ж продукції для Польщі загалом; GVA_{r_w} – валова додана вартість у металургійному секторі r_w -го підregionу w -го воєводства Польщі; $S(j_{w,r_w})$ – площа промислового об'єкта $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$ з карти землекористування.

Кожен парниковий газ має власне значення потенціалу глобального потепління (GWP – англ. Global Warming Potential) – коефіцієнта, який визначає ступінь впливу на глобальне потепління [5]. Тому сумарні результати інвентаризації парникових газів часто подають у CO_2 -еквіваленті. Для представлення результатів у такому вигляді потрібно просумувати емісії вуглекислого газу, метану і закису азоту з врахуванням потенціалу глобального потепління. Це здійснюється за формулою:

$$E_{metal}^{\Sigma}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})] = \sum \left\{ W_g \cdot \sum_{f \in F} E_{metal}^{g,f}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})] \right\},$$

$$j_{w,r_w} = \overline{1, J_{w,r_w}}, \quad r_w = \overline{1, R_w}, \quad w = \overline{1, W},$$

де $E_{metal}^{\Sigma}[\eta_{ind}(j_{w,r_w})]$ – сумарна емісія всіх парникових газів від використання всіх видів викопного палива у елементарному об'єкті $\eta_{ind}(j_{w,r_w})$ у CO_2 -еквіваленті; W_g – коефіцієнт глобального потепління відповідного парникового газу, $W_{CO_2} = 1$, $W_{CH_4} = 25$, $W_{N_2O} = 298$.

За результатами математичного моделювання процесів емісії парникових газів у металургійному секторі Польщі створено георозподілені кадастри емісій, які візуалізовано у вигляді тематичних карт, що ілюструють величину емісії кожним аналізованим джерелом. Як приклад, на рис. 3 представлено результати інвентаризації емісій парникових газів у еквіваленті CO_2 для 2010 року. На цьому рисунку представлено структуру емісій основних парникових газів (вуглекислого газу, метану і закису азоту) на рівні воєводств Польщі.

Як бачимо з цього рисунку, найбільші емісії парникових газів мають місце у Сілезькому воєводстві, саме там розташовані 7 найбільших металургійних заводів Польщі. Це зумовлено тим, що металургійна промисловість потребує використання великої кількості кам'яного вугілля, а в Сілезькому воєводстві зосередженні майже усі шахти, які видобувають вугілля у цій країні. Результати інвентаризації на рівні підприємств і промислових об'єктів було просумовано до рівня країни і представлено у табл.1. Це дає можливість порівняти отримані результати з даними національних інвентаризаційних звітів Польщі (табл. 2). Як бачимо, різниця отриманих результатів становить менше 5 %. Ця різниця зумовлена тим, що у

роботі використано специфічні коефіцієнти теплотворної здатності палива для деяких підприємств, отримані зі звітності цих підприємств, а у інвентаризаційних звітах ці коефіцієнти брались загальнодержавні [6].

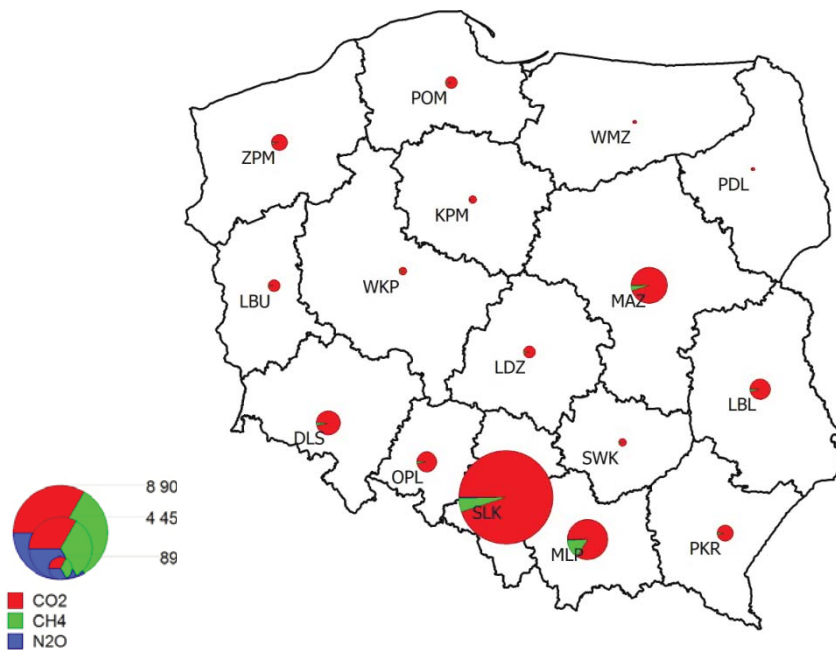


Рис. 3. Структура емісій двоокису вуглецю, метану і закису азоту (в CO₂-еквіваленті), які виникають внаслідок спалювання викопного палива у металургійному секторі Польщі (Гг, 2010 р.)

Таблиця 1. Сумарні результати просторової інвентаризації емісій парникових газів у металургійному секторі Польщі на рівні країни у розрізі різних видів палива та парникових газів (Гг, 2010 р.)

| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O |
|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Металургія | 6 334,43 | 0,59 | 0,07 |
| Рідке паливо | 36,79 | 0,0014 | 0,0003 |
| Тверде паливо | 4 915,47 | 0,4522 | 0,0668 |
| Газоподібне паливо | 1 382,17 | 0,1149 | 0,0023 |

Таблиця 2. Результати інвентаризації парникових газів у металургійному секторі Польщі, наведені у національному інвентаризаційному звіті (Гг, 2010 р.)

| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O |
|------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Металургія | 6 399,93 | 0,60 | 0,07 |

Висновок. Розроблено математичну модель для дослідження процесів емісії вуглекислого газу, метану та закису азоту, які виникають внаслідок спалювання викопного палива на металургічних підприємствах Польщі. Реалізація цієї моделі дає змогу аналізувати величину та структуру емісій на рівні окремих ділянок території.

Наведено методику формування елементарних об'єктів цифрової карти Польщі. Аналіз емісій на рівні елементарних об'єктів забезпечує максимальну адаптацію математичної моделі для реалізації просторової інвентаризації парникових газів, оскільки ці елементарні об'єкти містять дані про територіальну приналежність до відповідних адміністративних районів.

Розроблений підхід та алгоритм аналізу процесів емісії парникових газів реалізовано у геоінформаційній системі. Результатом такого аналізу є цифрові карти та відповідні георозподілені бази даних, що містять інформацію про джерела емісій, кількісні оцінки емісій та їх структуру для окремих категорій джерел, сортів палива та видів парникових газів.

З використанням реальних статистичних даних проведено моделювання емісії парникових газів прямої дії від металургійного сектору, проаналізовано структуру емісій та їх територіальний розподіл. Результати просторової інвентаризації наочно ілюструють внесок кожної окремо взятої елементарної ділянки в загальні емісії парникових газів, дають змогу виявити найбільш забруднені території, а також досліджувати структуру емісій по категоріях джерел та по видах використаного палива. Одержані розподілені оцінки емісій парникових газів дають змогу планувати та впроваджувати заходи щодо зниження емісій у тих місцях, де вони є найбільш вагомими. Роботу виконано в рамках проекту 7FP Marie Curie Actions IRSES project No. 247645.

1. Бунь Р. А. Інформаційні технології формування кадастру емісій парникових газів Львівщини / [Бунь Р. А., Шпак Н. О., Матолич Б. М. та ін.]. – Львів : Укрпол, 2010. – 272 с.
2. Бунь Р. А. Геоінформаційна технологія просторової інвентаризації парникових газів в енергетичній галузі на регіональному рівні / Р. А. Бунь, Х. В. Гамаль // Вісник СЛУ ім. Даля. – 2008. – № 1 (119). – С. 17 - 25.
3. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds). – IPCC, IGES, Japan, 2006.
4. Poland's National Inventory report 2012: Greenhouse Gas Inventory for 1988-2010. National Centre for Emission Management at the Institute of Environmental Protection. – Warszawa : National Research Institute, 2012.
5. GIS, Spatial Analysis and Modeling / Eds. D. J. Maguire, M. Batty, M. Goodchild. – Redlands : ESRI Press, 2005. – 482 p.
6. Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2009 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2012. – Warszawa, 2011.

Поступила 4.08.2014р.