

# ТЕХНОГЕННА ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

УДК 004.942:519.876.5

*М.О. Галушак<sup>1</sup>, Р.А. Бунь<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, професор, М. Йонас<sup>3</sup>, PhD  
(<sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка",  
<sup>2</sup>Академія бізнесу в Домброві Гурнічій, Польща,  
<sup>3</sup>Міжнародний інститут прикладного системного аналізу; Австрія*

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРИ ВИДОБУВАННІ І ПЕРЕРОБЦІ НАФТИ У ПОЛЬЩІ

Здійснено огляд відомих підходів до оцінювання емісій парникових газів у різноманітних галузях господарської діяльності. Описано особливості та наведено класифікацію емісійних процесів при видобуванні і переробці нафти. Обґрунтовано математичні моделі цих процесів, які враховують леткі емісії діоксиду вуглецю та метану при видобуванні, транспортуванні та переробці нафти, а також емісії діоксиду вуглецю, метану та закису азоту від використання викопного палива у технологічному процесі переробки нафти. Емісійні процеси досліджено на рівні окремих родовищ і нафтопереробних заводів Польщі. Для проведення просторової інвентаризації створено цифрову карту джерел емісії та здійснено ряд обчислювальних експериментів, у результаті яких отримано оцінки емісій парникових газів. Результати просторової інвентаризації емісій візуалізовано за допомогою цифрових карт та оцінено невизначеність отриманих результатів.

**Ключові слова:** емісія парникових газів, видобування і переробка нафти, математична модель, кадастр емісій, просторове моделювання, база геопросторових даних, Польща.

*М.О. Галушак, Р.А. Бунь, М. Йонас*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТИ В ПОЛЬШЕ

Осуществлен обзор известных подходов к оценке эмиссий парниковых газов в различных отраслях хозяйственной деятельности. Описаны особенности и приведена классификация эмиссионных процессов при добыче и переработке нефти. Обоснованы математические модели этих процессов, учитывающих летучие эмиссии диоксида углерода и метана при добыче, транспортировке и переработке нефти, а также эмиссии диоксида углерода, метана и закиси азота от использования ископаемого топлива в технологическом процессе переработки нефти. Эмиссионные процессы исследованы на уровне отдельных месторождений и нефтеперерабатывающих заводов Польши. Для реализации пространственной инвентаризации создана цифровая карта источников эмиссии и осуществлен ряд вычислительных экспериментов, в результате которых получены оценки эмиссий парниковых газов. Результаты пространственной инвентаризации эмиссий визуализированы с помощью цифровых карт и оценены неопределенности полученных результатов.

**Ключевые слова:** эмиссия парниковых газов, добыча и переработка нефти, математическая модель, кадастр эмиссий, пространственное моделирование, база геопространственных данных, Польша.

## **MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSIS OF GREENHOUSE GASES EMISSION AMBIGUITY FOR OIL PRODUCTION AND RECYCLING IN POLAND**

The article deals with the famous approaches of greenhouse gases emission evaluation in different branches of business activities. The peculiarities have been described. Emission processes at oil production and recycling have been classified. Mathematical modelling of these processes, which take into account carbon dioxide and methane volatile emissions for oil production, transporting and recycling, and carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions from using fossil fuel in oil recycling technological process. Emission processes have been researched on the level of separate fields and oil refineries in Poland. To provide space inventory, emissions digital map has been created. Computing experiments have been carried out, as a result of which greenhouse gases emission have been evaluated. The results of space inventory have been visualised with the help of digital maps and the ambiguity of obtained results has been evaluated.

**Key words:** greenhouse gases emission, oil production and recycling, mathematical model, emission survey, space modelling, geospatial data base, Poland.

**Вступ та аналіз відомих підходів.** Людство стикнулось з однією з найсерйозніших глобальних екологічних проблем – зміною клімату на нашій планеті. Кліматичні зміни не означають лише підвищення середньорічної температури, а й спричиняють перебудову всіх геосистем нашої планети. Факт зростання середньої температури поверхні Землі є незаперечним, за останні 100 років температура підвищилась на  $0,37-0,44^{\circ}\text{C}$ , а порівняно з 1880-ми роками – аж на  $0,88^{\circ}\text{C}$  [1]. Такі наслідки вчені пов'язують з різким зростанням концентрації в атмосфері Землі так званих «парникових газів». Спалювання викопного палива, промислове виробництво, нераціональне ведення сільського господарства, зміни в землекористуванні та вирубування лісів спричиняють значні емісії антропогенних парникових газів. Останнім часом науковці активно шукають шляхи подолання чи хоча б послаблення глобальної зміни клімату. Найсуттєвішим кроком у цьому напрямку є скорочення емісій парникових газів. З цією метою було підписано ряд міжнародних угод, серед яких однією з найважливіших є Кіотський протокол. Міжнародна група експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) розробила ряд методик для створення національних кадастрів емісій парникових газів [2]. Такі кадастри є корисними для перевірки дотримання домовленостей країнами-учасниками, але для скорочення емісій, кожній державі важливо мати інформацію про територіальне розміщення джерел і їх особливості. У зв'язку з цим виникає потреба створити просторові кадастри емісій парникових газів, які б давали можливість оцінювати емісії на рівні окремих джерел.

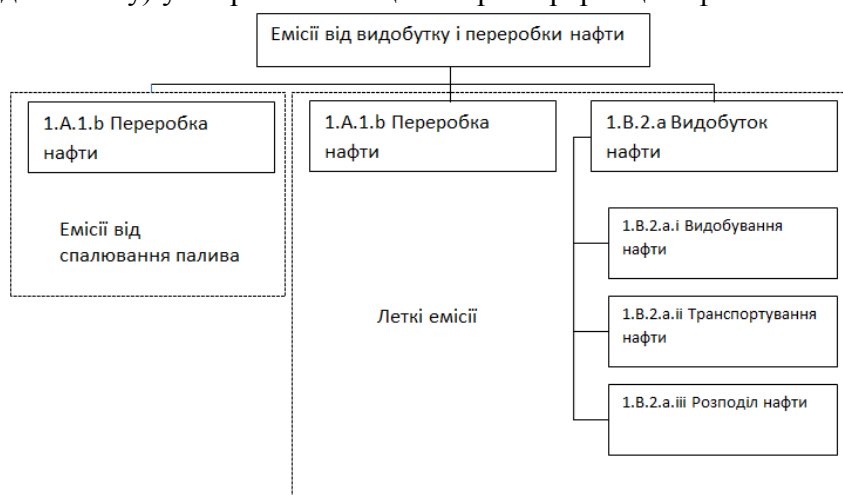
Емісії парникових газів при видобуванні і переробці нафти є незначними, порівняно з емісіями від електроенергетики чи промисловості, і становлять не більше 2% від сумарних емісій в енергетичному секторі. Але для проведення повної інвентаризації парникових газів вкрай необхідно враховувати всі категорії господарської діяльності.

**Мета дослідження.** Просторова інвентаризація емісій парникових газів при видобуванні і переробці нафти у Польщі на рівні родовищ і нафтопереробних заводів ще не здійснювалась, тому метою цього дослідження є вирішення актуального наукового завдання – розроблення математичних моделей, які б описували процеси емісії у цій галузі, а також створення геоінформаційної технології для просторового аналізу таких процесів.

**Особливості процесів емісії парникових газів при видобуванні і переробці нафти.** Нафта – це маслянисто темно-коричнева рідина з червоним чи зеленуватим відливом, інколи чорна, синя чи навіть майже прозора. За своїм складом – це суміш різних видів вуглеводнів, яку використовують у різних енергетичних потребах, а також як сировину для хімічної промисловості. У сирому стані нафту майже не застосовують. Для отримання готових нафтоп-

родуктів, сиру нафту спочатку очищають (видаляють воду та шкідливі домішки), а потім здійснюють термічну перегонку на фракції: при нагріванні до 40-180°C виділяються пари авіабензину, при 200-300°C – гасу, при 270-350°C – газойлю. Після світлих нафтопродуктів виділяють ще спочатку мазут, потім гудрон. Всього з нафти виробляють більше 560 різних нафтопродуктів [3] і всі ці процеси супроводжуються емісією у атмосферу парникових газів, таких як вуглекислий газ, метан і закис азоту.

У відповідності з рекомендаціями МГЕЗК [2], при інвентаризації емісій парникових газів під час видобування і переробки нафти слід враховувати два типи емісій: леткі емісії та емісії від спалювання палива. Відповідну класифікацію наведено на рис. 1. Вона включає леткі емісії метану, які виникають внаслідок видобування, транспортування і переробки нафти, а також емісії вуглекислого газу, які емітуються під час видобування і транспортування сирої нафти (в цю категорію включено також емісії від спалювання у факелах накопиченого метану, який вивільняється під час видобування нафти). Емісії діоксиду вуглецю, метану і закису азоту, що виникають від спалювання палива – це емісії від використання викопного палива (нафти і природного газу) у енергетичних цілях при переробці нафти.



*Рисунок 1 – Структурна схема емісій парникових газів, які виникають при видобуванні і переробці нафти (на підставі [4])*

За даними 2010 р. у Польщі функціонує більше як 70 нафтових родовищ, які знаходяться у межах Центральноєвропейського, Північно-Передкарпатського і Карпатського нафтогазоносних басейнів. Станом на 31 грудня 2010 року в Польщі функціонували 3 компанії з видобутку нафти та газу та переробки нафти: ORLEN, LOTOS, PGNiG, які були власниками шести працюючих нафтопереробних заводів на території Польщі.

**Математична модель.** Основне завдання просторової інвентаризації парникових газів полягає у визначенні розташування джерел емісій та оцінюванні величини емісій [5]. Така інвентаризація надає користувачу більше інформації про емісійні процеси, порівняно з традиційною інвентаризацією на національному рівні, оскільки при цьому емісії відображають у тих місцях, де вони в дійсності мають місце.

З метою формування бази геопросторових даних про емісії парникових газів, які виникають під час видобування і переробки нафти, у цій роботі створено цифрову карту родовищ і нафтопереробних заводів Польщі. При цьому зроблено припущення, що відповідні джерела емісії є точковими, оскільки розміри родовищ є невеликими у порівнянні з площею аналізованої території. Для обчислення сумарних емісій парникових газів у досліджуваному секторі господарської діяльності використовуємо математичний опис, який враховує представлену на рис. 1 структуру емісійних процесів:

$$E_{oil}^{\Sigma}(\xi_n, \eta_k) = \sum_{g \in G} \left\{ W_g \left[ \sum_{f \in F} \sum_{\eta_k} E_{ref}^{g,f}(\eta_k) + \sum_{\eta_k} E_{ref}^g(\eta_k) + \sum_{\xi_n} E_{oil}^g(\xi_n) \right] \right\}, \quad (1)$$

де  $E_{oil}^{\Sigma}(\xi_n, \eta_k)$  – сумарні леткі емісії парникових газів, а також емісії, спричинені використанням усіх видів викопного палива у нафтовій промисловості, у  $CO_2$ -еквіваленті;  $W_g$  – коефіцієнт глобального потепління відповідного парникового газу, зокрема  $W_{CO_2} = 1$ ,  $W_{CH_4} = 25$ ,  $W_{N_2O} = 298$ ;  $E_{ref}^{g,f}(\eta_k)$  – річні емісії  $g$ -го парникового газу, які виникають внаслідок спалювання викопного палива  $f$ -го виду на нафтопереробному заводі  $\eta_k$ , причому  $g$  – перерахункова змінна, яка відповідає певному парниковому газу,  $g \in \{CO_2, N_2O, CH_4\}$ ;  $E_{ref}^g(\eta_k)$  – леткі емісії парникових газів, які виникають у ході реалізації технологічного процесу на  $\eta_k$ -му нафтопереробному заводі;  $E_{oil}^g(\xi_n)$  – річні леткі емісії  $g$ -го парникового газу, які виникають внаслідок видобування нафти з  $\xi_n$ -го родовища.

Для проведення просторової інвентаризації летких емісій парникових газів, які виникають внаслідок видобування нафти, представляємо їх у такому вигляді:

$$E_{oil}^g(\xi_n) = E_{oil,e}^g(\xi_n) + E_{oil,t}^g(\xi_n), \quad g \in (CO_2, CH_4), \quad (2)$$

де  $E_{oil}^g(\xi_n)$  – річні леткі емісії  $g$ -го парникового газу, які виникають внаслідок видобування нафти на  $\xi_n$ -му родовищі;  $E_{oil,e}^g(\xi_n)$  – емісії, які виникають безпосередньо під час видобування нафти на  $\xi_n$ -му родовищі;  $E_{oil,t}^g(\xi_n)$  – емісії від розподілу і транспортування нафти з цього родовища.

Оскільки у статистичній звітності не відображені дані про видобуток нафти на кожному окремо взятому родовищі, зроблено ряд припущень для оцінювання таких емісій. Зокрема, математичні моделі летких емісій парникових газів, які виникають під час видобування і транспортування нафти, представлено, відповідно, у вигляді:

$$E_{oil,e}^g(\xi_n) = \frac{A_{oil}^{\Sigma} \cdot P_{oil}(\xi_n)}{\sum_{j=1}^N P_{oil}(\xi_j)} \cdot K_{oil,e}^g, \quad E_{oil,t}^g(\xi_n) = \frac{A_{oil}^{\Sigma} \cdot P_{oil}(\xi_n)}{\sum_{j=1}^N P_{oil}(\xi_j)} \cdot K_{oil,t}^g, \quad g \in (CO_2, CH_4), \quad (3)$$

де  $A_{oil}^{\Sigma}$  – річний видобуток нафти у Польщі;  $P_{oil}(\xi_n)$  – потужність  $\xi_n$ -го нафтового родовища;  $K_{oil,e}^g$  та  $K_{oil,t}^g$  – коефіцієнти емісії  $g$ -го парникового газу на  $\xi_n$ -му родовищі, відповідно, при видобуванні та транспортуванні нафти.

Опишемо емісії парникових газів від спалювання викопного палива на нафтопереробних заводах математично:

$$E_{ref}^{g,f}(\eta_k) = D_{stat,ref}^f \cdot K_{ref}^f(\eta_k) \cdot K_{em,ref}^{g,f}(\eta_k), \quad (4)$$

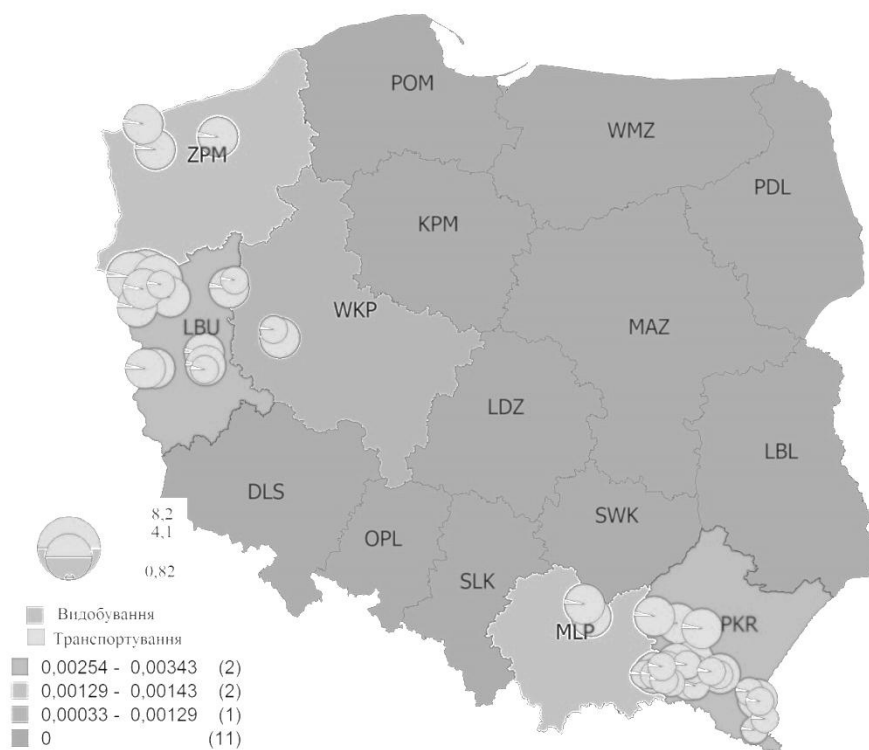
де  $E_{ref}^{g,f}(\eta_k)$  – річні емісії  $g$ -го парникового газу, які виникають внаслідок спалювання викопного палива  $f$ -го виду на нафтопереробному заводі  $\eta_k$ ,  $f$  – вид використаного палива,  $f \in \{\text{нафта, природний газ}\}$ ,  $g$  – перерахункова змінна, яка відповідає певному парниковому газу,  $g \in \{CO_2, N_2O, CH_4\}$ ;  $D_{stat,ref}^f$  – загальнонаціональні статистичні дані про використане паливо  $f$ -го виду на переробку нафти;  $K_{ref}^f(\eta_k)$  – дезагрегаційний коефіцієнт для використаного  $f$ -го виду палива для об'єкта  $\eta_k$ ;  $K_{em,ref}^{g,f}(\eta_k)$  – коефіцієнт емісії  $g$ -го парникового газу від спалювання  $f$ -го виду палива на потреби нафтопереробного заводу  $\eta_k$ .

Для реалізації просторової інвентаризації емісій парникових газів у нафтовій промисловості Польщі розроблено геоінформаційну технологію, в якій використано описані вище

математичні моделі. Вхідними даними для математичних моделей (1)-(4) є відповідна статистична інформація на рівні країни чи окремо взятого джерела емісії. Статистичні дані взято з сайту локального банку даних Польщі [6]. Специфічні параметри та коефіцієнти емісії для нафтової промисловості використано з польського національного звіту з інвентаризації парникових газів за 2012 рік [7].

**Результати просторового аналізу емісій.** Використовуючи розроблені математичні моделі (1)-(4) та геоінформаційну технологію сформовано бази геопросторових даних емісій парникових газів у нафтовій промисловості Польщі. Як приклад, на рис. 2 представлено цифрову карту емісій, які виникають при видобуванні нафти у Польщі. Відповідно до результатів просторової інвентаризації, леткі емісії парникових газів розподіленні вкрай нерівномірно, що пояснюється нерівномірним розташуванням покладів нафти у Польщі. Як бачимо з рис. 2, найбільші питомі емісії парникових газів зосередженні у Любуському та Підкарпатському воєводствах, найменші – у Великопольському.

У секторі видобування і переробки нафти найбільше емісій виникає внаслідок спалювання викопного палива (зокрема, нафти і газу) на нафтопереробних заводах, у результаті чого до атмосфери емітується 6205,75 Гг вуглекислого газу, 0,18 Гг метану та 0,03 Гг закису азоту, а також 0,71 Гг летких емісій метану. Оскільки величини емісій парникових газів є різних порядків (діоксиду вуглецю у порівнянні з метаном та закисом азоту), тому їх важко відобразити на одній карті. Саме тому на рис. 3 окремо представлено структуру річних летких емісій метану, а також емісії метану і закису азоту від спалювання палива на рівні нафтопереробних заводів (тобто без  $CO_2$ ), а кольором відображено величину питомих емісій вуглекислого газу на рівні воєводств. Безперечним лідером у сумарних емісіях парникових газів є нафтопереробний завод, який знаходиться у м. Плоцьк Мазовецького воєводства, частка емісій від якого становить 63% від емісій у досліджуваному секторі всієї Польщі.

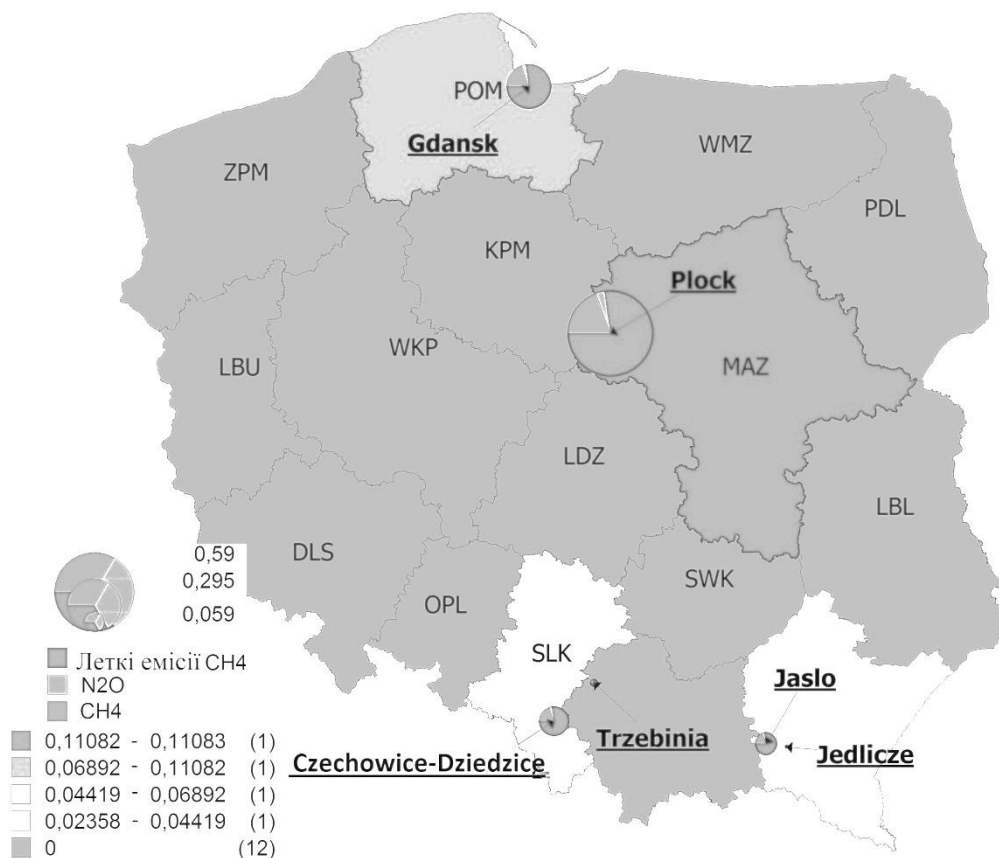


**Рисунок 2** – Структура річних летких емісій метану і вуглекислого газу на рівні родовищ Польщі (Гг) та питомі емісії парникових газів (Гг/км<sup>2</sup>) від видобування нафти на рівні воєводств (CO<sub>2</sub>-екв, 2010 р.)

**Оцінка невизначеності отриманих результатів.** Оцінка невизначеності є невід’ємним елементом інвентаризаційного процесу, оскільки виміряти скільки емісій парникових газів потрапляє у атмосферу за досить великий проміжок часу практично неможливо. Сама інвентаризація полягає в оцінці емісій, що в собі несе „непевність” або невизначеність отриманих результатів. Поняття “невизначеність” виражає недостатність знань про істинне значення деякої величини і описується за допомогою функції щільності, що характеризує діапазон та ймовірність появи можливих значень [8].

При моделюванні значень емісій парникових газів та відповідних діапазонів невизначеності зроблено припущення, що усі використовувані вхідні параметри є статистично незалежними величинами. Результати моделювання за допомогою методу Монте Карло наведено у табл. 1 окремо для кожного нафтопереробного заводу (кількість реалізацій – 500 тис.). У випадку несиметричних невизначеностей, як для метану, азоту і, відповідно, сумарних емісій, вказано нижню та верхню межі 95% довірчого інтервалу.

Досліджуваний сектор характеризується високою невизначеністю, оскільки сумарні невизначеності в основному залежать від невизначеностей емісійних коефіцієнтів. Оцінити емісійні коефіцієнти легких емісій є досить важко, оскільки вони в основному залежать від природи процесів, внаслідок яких вони виникають. Натомість емісійний коефіцієнт вуглекислого газу залежить в основному лише від вмісту карбону у паливі, що дуже легко визначити.



**Рисунок 3 – Структура річних емісій парникових газів від переробки нафти у Польщі: емісії  $CH_4$  та  $N_2O$  від спалювання палива і легкі емісії  $CH_4$  на рівні заводів (Гг,  $CO_2$ -екв) та питомі емісії  $CO_2$  на рівні воєводств (Гг/км<sup>2</sup>), 2010 р.**

Результати моделювання емісій та відповідних невизначеностей  
на рівні нафтопереробних заводів

Місто	Емісії CO <sub>2</sub> , Гг; невизначеності, %	Емісії CH <sub>4</sub> , Гг; невизначеності, %	Емісії N <sub>2</sub> O, Гг; невизначеності, %	Сумарні емісії, Гг; невизначено- сті, %
Плоцьк	3 936,04	0,11	0,02	3936,34
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Тжебіня	67,91	0,001	0,0003	67,9003
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Єдличе	11,95	0,0003	0,0001	11,95003
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Гданськ	1 248,28	0,03600	0,01	1 248,41
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Ясло	407,49	0,011	0,002	407,5
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51
Чеховіце- Дзедзіце	543,32	0,02	0,003	543,42
	15,32	-39,35..+52,97	-71,38..+168,4	-15,36..+15,51

**Висновки.** Розроблена геоінформаційна технологія інвентаризації парникових газів у нафтовій промисловості дає можливість оцінити емісії на рівні окремо взятих родовищ чи нафтопереробних заводів, а це відкриває шлях до визначення потенціалу підприємства, регіону чи країни в цілому щодо скорочення емісій у досліджуваному секторі. Представлений математичний опис емісійних процесів може бути застосований для просторової інвентаризації парникових газів і для інших країн з врахуванням доступних статичних даних.

#### Список літератури

1. National Oceanic and Atmospheric Administration / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.noaa.gov/stories2015/noaa-analysis-journal-science-no-slowdown-in-global-warming-in-recent-years.html>
2. IPCC Guidelines for National GHG Inventories / Н. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, eds. // [IPCC]. – Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan. – 2006.
3. Клименко Л. П. Техноекоекологія / Л. П. Клименко. – Сімферополь : Таврія, 2000. – 542 с.
4. Common Reporting Framework : Fugitive Emissions from Fuels / Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. – IPCC/OECD/IEA, 1996.
5. Бунь Р. А. Інформаційні технології просторової інвентаризації парникових газів у енергетичному секторі та аналіз невизначеності / Р. А. Бунь, Х. В. Бойчук, А. Р. Бунь, М. Ю. Лесів. – Львів : ПП Сорока Т., 2012. – 464 с.
6. Bank Danych Lokalnych [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.stat.gov.pl>
7. 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.
8. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, Penman Jim, Dina Kruger, Ian Galbally et al.; IPCC, 2001.

## References

1. National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://www.noaa.gov/stories2015/noaa-analysis-journal-science-no-slowdown-in-global-warming-in-recent-years.html>
2. IPCC Guidelines for National GHG Inventories, H.S.Eggleston, L.Buendia, K.Miwa, eds., IPCC, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan, 2006.
3. Klymenko L.P. Technoecology, Simpheropol, Tavriya, 2000, 542 p.
4. Common Reporting Framework : Fugitive Emissions from Fuels, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC/OECD/IEA, 1996.
5. Bun R., Boychuk Kh., Bun A., Lesiv M. Information technologies for spatial inventory of greenhouse gases in energy sector and uncertainty analysis, Lviv, PP Soroka T., 2012, 464 p.
6. Bank Danych Lokalnych, <http://www.stat.gov.pl>
7. 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.
8. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, Penman Jim, Dina Kruger, Ian Galbally et al.; IPCC, 2001.

