

4. Концепції та інструментарій нелінійної економічної динаміки / В.В. Вітлінський, Ю.В. Коляда, А.Я. Махоткіна // Моделювання та інформаційні системи в економіці: зб. наук. праць. — К.: КНЕУ, 2011. — Вип. 84. — С. 29—35.

5. *Конноховский П.В.* Микроэкономическое моделирование банковской деятельности. — СПб.: Питер, 2001. — 224 с.

6. Моделювання економічної динаміки : навч. посібн. / Г.В. Лавінський, О.С. Пшенишнюк, С.В. Устенко, О.Д. Шарапов. — К. : Вид-во «Атіка», 2006. — 276 с.

7. Модифікації моделей нелінійної динаміки та сценарії розвитку банку / Ю.В. Коляда, А.О. Харламов, В.І. Трохановський // Моделювання та інформаційні системи в економіці: зб. наук. праць. — К.: КНЕУ, 2012. — Вип. 86. — С. 236—244.

8. Нелінійна динаміка процесу функціонування комерційного банку на підґрунті неперервної математичної моделі / В.В. Вітлінський, Ю.В. Коляда, А.О. Харламов // Бізнес-інформ: наук. журнал. — Х., 2012. — Вип. №3. — С. 29—34.

9. *Симо К.* Изучение динамических систем с использованием компьютера / К. Симо // Нелинейная динамика. — 2006. — Т. 2. — С. 243—254.

10. *Янковский И.* Генезис математических моделей банка // Банковский вестник. — Минск, 2008. — С. 27—30.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2012 р.

УДК 621.039.7.001.2

О.В. Скляренко, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
О.В. Золотаренко,
ПВНЗ «Європейський університет»,
м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ПІД ВПЛИВОМ ТЕПЛОЕНЕРГОЦЕНТРАЛІ

АНОТАЦІЯ. У даній статті досліджуються процеси забруднення довкілля від викидів ТЕЦ–5 м. Києва, розроблено стохастичні моделі для визначення допустимо можливих викидів оксидів вуглецю, азоту та сполук сірки в компонентах урбоєкосистеми, проведено розрахунки концентрацій забруднюючих речовин на сьогодні та наступні 5 років із застосуванням комп'ютерного прикладного пакету *Mathcad*, на основі яких зроблені висновки щодо впливу ТЕЦ на довкілля.

ANNOTATION. This article investigates the processes of pollution emissions from TEC-5, Kyiv, developed stochastic models to determine the permissible potential emissions of oxides of carbon, nitrogen and

sulfur compounds in components urboecosystemy, calculations of concentrations of pollutants for today and the next 5 years using computers' aided application package Mathcad, from which conclusions about the impact of TEC on the environment.

КЛЮЧОВІ СЛОВА. Забруднення, теплоенергоцентрально (ТЕЦ), моделювання, матриця, регулярні ланцюги Маркова, імовірність, гранично допустимі концентрації та викиди (ГДК та ГДВ), геосфера, біоценоз.

Електроенергетика є базовою галуззю народного господарства розвинених держав, у тому числі і України. Значна частина електроенергії виробляється на теплоелектростанціях (ТЕС) і теплоенергоцентралях (ТЕЦ), які працюють на таких видах палива, як природний газ, мазут і вугілля. При цьому кількість викидів прямо пропорційна кількості виробленої енергії. Тому, найбільшими забруднювачами в Україні є ТЕЦ і ТЕС. Так, у Києві на долю ТЕЦ припадає 53 % усіх викидів у атмосферу [6]. Тому моніторинг процесів забруднення довкілля внаслідок негативного впливу від ТЕЦ є на сьогодні актуальним і дуже важливим питанням, що привертає увагу усієї світової спільноти.

На відміну від інших дослідників цих проблем (О.О. Попов [5], Н.П. Нечаєва, М.В. Парасюк [6], В.І. Жлуктенко, С.І. Наконечний [1] та ін.) у даній статті проведено дослідження процесів забруднення від викидів ТЕЦ-5 м. Києва із застосуванням математичного та комп'ютерного моделювання. Місцезона даної ТЕЦ дає підставу непокоїтись за здоров'я населення, яке проживає поряд із джерелом забруднення та піддається його безпосередньому впливу, тому робота має значну актуальність.

Метою роботи є дослідження, моделювання та прогнозування процесів забруднення довкілля під впливом забруднюючого джерела ТЕЦ-5 м. Києва.

Для досягнення мети вирішувались наступні **завдання**:

- розробка стохастичної моделі для знаходження допустимо можливих викидів забруднюючих речовин ТЕЦ-5 міста Києва;
- проведення дослідження міграції оксиду вуглецю, оксидів азоту та сполук сірки в компонентах урбоекосистеми;
- визначення стану забруднення довкілля за період часу від 22 грудня 1971 року (ввід в експлуатацію ТЕЦ-5) до теперішнього часу;
- розрахунок орієнтовних концентрацій забруднюючих речовин на наступні 5 років із застосуванням комп'ютерного пакету MathCad;
- надання висновків щодо впливу ТЕЦ на довкілля.

Найвагомішими серед викидів забруднюючих речовин і парникових газів в атмосферне повітря при роботі теплових електростанцій, що спалюють органічне паливо є викиди оксидів сірки SO_2 , оксидів азоту NO_2 , діоксиду вуглецю CO_2 . Ці забруднюючі та шкідливі речовини, а також парникові гази мають такий вплив на довкілля:

- викиди оксидів сірки SO_2 згубно діють на природу та живі організми;

- оксиди азоту NO_2 мають токсичний вплив;

- викиди діоксиду вуглецю CO_2 створюють парниковий ефект, пропускаючи до землі сонячну радіацію, але не даючи зворотнього виходу інфрачервоному (тепловому) випромінюванню [5].

Одним із найтоксичніших газоподібних викидів енергоустановок є діоксид сірки SO_2 , що становить 98—99 % викидів сірчистих сполук ТЕЦ. При горінні сірка повністю перетворюється на SO_2 , проходить електрофільтри й переноситься в атмосферу. В присутності кисню відбувається окислення SO_2 в SO_3 . При з'єднанні з водою ці окисли утворюють сірчисту та сірчану кислоти, що осідають на землю у вигляді «кислотних дощів». Наявність сірчаної кислоти в димових газах викликає низькотемпературну корозію поверхонь нагріву котла, газоходів і металевих конструкцій димової труби.

Окисли азоту, що викидаються з димовими газами ТЕС, утворюються як за рахунок високотемпературних процесів, що протікають у факелі викидів (фіксація атмосферного азоту), так і за рахунок окислення азотовмісних сполук самого палива. На виході з труби окисли азоту димових газів складаються на 85—90 % із NO та на 10—15 % із NO_2 . В атмосфері відбувається швидке окислення NO в NO_2 , що посилює негативний вплив димових газів на природу та живі організми, оскільки двоокис азоту є більш токсичним. Основним негативним впливом окислів азоту на довкілля є каталітичне руйнування озонового шару, який поглинає жорстке ультрафіолетове випромінювання (1 т NO_2 руйнує до 1 тис. т озону).

Теплова енергетика на органічному паливі є також одним із головних джерел викидів парникових газів, які вважаються причиною глобальних змін клімату.

Крім атмосфери, викиди ТЕС негативно впливають на земну поверхню, ґрунт і рослинність через осідання на них пилу та випадіння «хімічного» дощу або снігу внаслідок розчинення аерозолів окислів сірки й азоту в атмосферній волозі та дощових або

снігових опадах, поверхневі води (осідання на водних поверхнях викинутих у повітря шкідливих речовин і змив їх у ріки та водойми дощовими і талими сніговими потоками). Результатами такого забруднення земної поверхні є окислення снігового покриву та сільськогосподарських угідь, нагромадження в ґрунті важких металів з вугільної золи, що пригнічує лісові біоценози, знижує врожайність агрокультур і насичує харчові продукти шкідливими для здоров'я людини сполуками.

Вплив ТЕЦ на водні об'єкти здійснюється за двома напрямками: використання водних ресурсів і прямий вплив ТЕЦ на якісний стан водних об'єктів шляхом скидання в них стічних вод із підвищеними порівняно з природною водою концентраціями забруднюючих речовин. Енергетичне виробництво ТЕЦ супроводжується також різноманітними забрудненими стоками, пов'язаними із процесом водопідготовки, промивання устаткування, з гідротранспортом твердих відходів (шлаків). Основна маса води на ТЕС використовується для охолодження конденсаторів парових турбін. Усі інші потреби у воді не перевищують 7 % [6].

Всі описані вище наслідки забруднення від ТЕЦ негативно впливають на здоров'я людини, спричиняють важкі, подекуди хронічні захворювання через значну токсичність сполук, мають канцерогенний, онкологічний, подразнюючий вплив на організм людини.

Як фактор впливу на господарство, забруднення, спричинене ТЕЦ, значно впливає на благополуччя населення. В сільському господарстві викиди забруднюючих речовин призводять до зменшення врожайів, деградації земель, погіршення якості продукції. Зменшується буферна здатність ландшафтних комплексів [4]. У промисловості через окислення погіршується цілісність металевих конструкцій.

Враховуючи географічне положення ТЕЦ-5, яка знаходиться в межах міста, та об'єми виробництва енергії, тепла, спалювання палива, важливим є постійний моніторинг цього об'єкту. Це є надзвичайно важливим для нормального функціонування міської агломерації, особливо для такого мегаполісу, як Київ.

У даній статті поставлена задача розглянути основні аспекти моделювання за сценарієм «Середнє забруднення за період» від початку забруднення довкілля від 22 грудня 1971 року, коли був запущений перший блок ТЕЦ — 5 до сьогодні та можливе надходження забруднюючих домішок в атмосферне повітря протягом наступних 5 років, а, згодом, і в довкілля в системі «підприємство — довкілля». Дослідження проводиться для визначення за-

бруднень по трьом показникам (NO, SO, CO) за умови збереження об'ємів викидів на даному рівні. За результатами моделювання можна визначити техногенні навантаження на територію міста від дії одного джерела забруднення, а також спроектувати на картах процес забруднення досліджуваної території (м. Київ).

Розглянемо найпростішу стохастичну модель — потоків частинок, що забруднюють атмосферу із застосуванням регулярних ланцюгів Маркова [1].

Досліджувана екосистема містить одне джерело забруднення атмосфери — ТЕЦ-5, яке викидає в атмосферу три забруднюючі речовини NO, CO, SO. Для кожної із них розрахунки проводяться окремо за аналогічними математичними моделями.

Для створення матриці однокрокового переходу Q розглянемо наступні стани переходу хімічних речовин у досліджуваній екосистемі:

ω_1 — біосфера; цей стан вважатимемо поглинальним, тобто його перехідні ймовірності в подальшому не враховуємо;

ω_2 — літосфера;

ω_3 — атмосфера;

ω_4 — гідросфера.

P_{ij} — ймовірність переходу досліджуваних речовин із стану ω_i до стану ω_j .

Визначимо перехідні ймовірності для CO.

Основним поглиначем CO з ґрунтів є рослини, які використовують його у фотосинтезі ($P_{21} = 0,49$). Із навколишнього середовища в ґрунт окис вуглецю потрапляє в основному із рештками органічної речовини, що розкладаються, через пори в землі, із підземним диханням рослин і перетворюється на гумус, залишаючись там у законсервованому стані ($P_{22} = 0,2$). Із ґрунту в атмосферу CO переходить через нестійкість елемента, дихання організмів, інші окислювальні реакції ($P_{23} = 0,01$), що протікають в ґрунті. А у гідросферу CO надходить як складова частина інших газів ($P_{24} = 0,3$). Найбільшими вловлювачами CO є у першу чергу рослини ($P_{31} = 0,695$), для яких він є головною умовою для продуктивного існування. З атмосфери в ґрунти переходить незначна частка газу ($P_{32} = 0,1$) через його малу питому вагу. Деяка частина окислюється і трансформується, наприклад у CO₂ ($P_{33} = 0,005$). Гідросфера є значним споживачем і великим світовим резервуаром CO, оскільки він є складовою цього середовища ($P_{34} = 0,2$). Основним осередком накопичення цього газу в воді є різноманітні гідробіоти ($P_{41} = 0,59$). З води у вигляді мулу і іншої органічної речовини він надходить до літосфери ($P_{42} = 0,2$). Разом з во-

дяним диханням CO переходить до атмосфери ($P_{43} = 0,01$). Тим не менш, деяка частина води завжди містить розчинений CO в будь-якому з його станів ($P_{44} = 0,2$).

$$\pi 1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,49 & 0,2 & 0,01 & 0,3 \\ 0,695 & 0,1 & 0,005 & 0,2 \\ 0,59 & 0,2 & 0,01 & 0,2 \end{pmatrix}.$$

Визначимо перехідні ймовірності для NO:

Біофільність азоту співрозмірна з біофільністю CO ($P_{21} = 0,6495$). В ґрунтах NO перетворюється на різні сполуки — нітрати, нітроти, які в значній мірі накопичуються в товщі землі ($P_{22} = 0,3$). Зворотний повітряний обмін азотовмісних елементів розвинений слабо, у зв'язку з фіксацією його в ґрунті ($P_{23} = 0,005$). У воду із ґрунту NO потрапляє безпосередньо при абразії берегів та водяному змиві ($P_{24} = 0,05$). Із повітря його поглинають ($P_{31} = 0,15$) азотобактерії, які і включають його в біогеохімічний цикл. З атмосфери NO потрапляє в ґрунт ($P_{32} = 0,4$) шляхом осідання. Під дією сонячної радіації, конвекційного перемішування, азот переходить з одного шару атмосфери в інший, або включається в склад полікомпонентних з'єднань ($P_{33} = 0,05$). У воду NO потрапляє також у незначних кількостях, почасти як супутній елемент ($P_{34} = 0,4$). У водному просторі він акумулюється в живих організмах ($P_{41} = 0,699$) через підвищену накопичувальну здатність гідробіонтів. У зв'язаному вигляді NO осідає на морському дні і з часом перетворюється на осадову породу ($P_{42} = 0,2$). Газообмін між атмосферою і морем постійно включає в себе і азот ($P_{43} = 0,001$). Сполуки азоту також завжди присутні у водяних розчинах ($P_{44} = 0,1$).

$$\pi 2 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,6495 & 0,3 & 0,0005 & 0,05 \\ 0,15 & 0,4 & 0,05 & 0,4 \\ 0,699 & 0,2 & 0,001 & 0,1 \end{pmatrix}.$$

Визначимо перехідні ймовірності для SO.

Сірка є одним з найважливіших елементів у складі живих організмів, присутня в них завжди і переходить в рослини, мікроорганізми та ін. разом з іншими поживними речовинами ($P_{21} = 0,495$). Основним накопичувачем сірки є літосфера. Під дією атмосферних опадів, тепла землі вона може окислюватись і утворювати сірчану кислоту, сірководень, різні оксиди ($P_{22} = 0,3$). Рух назад в атмосферу стримується поглинанням SO організмами ($P_{23} = 0,005$). У сірки, як розчинної речовини, обмін з гідросферою здійснюється досить активно ($P_{24} = 0,2$). Поглинання SO з повітря є необхідним проявом їх життєдіяльності ($P_{31} = 0,3$). Разом з кислотними дощами, викидами підприємств, вулканічними газами вона потрапляє в ґрунт ($P_{32} = 0,3$). Існує багато видів з'єднань сірки, що циркулюють в атмосфері ($P_{33} = 0,1$). У гідросфері вона також потрапляє з атмосферними опадами ($P_{34} = 0,3$). У воді живі організми активно сорбують її ($P_{41} = 0,297$). Розкладення органіки призводить до повернення сірки до літосфери ($P_{42} = 0,2$). У повітря вона потрапляє так само, як і CO, NO ($P_{43} = 0,003$). До моменту поглинання, або переходу до іншої з геосфер, вона циркулює у воді ($P_{44} = 0,5$) [8].

$$\pi_3 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,495 & 0,3 & 0,005 & 0,2 \\ 0,3 & 0,3 & 0,1 & 0,3 \\ 0,297 & 0,2 & 0,003 & 0,5 \end{pmatrix}.$$

Оскільки однією з цілей створення моделей було порівняння теперішнього стану забруднення з рівнем забруднення до введення в експлуатацію ТЕЦ-5, були визначені рівні фонового вмісту елементів у довкіллі та їх вміст станом на 1971 рік. У векторно-матричному рівнянні вони задані як вектор початкових забруднень $M(m_1, m_2, m_3)$, де m_1 — початковий вміст речовини в літосфері, m_2 — початковий вміст речовини в атмосфері, m_3 — початковий вміст речовини в гідросфері.

Фонова концентрація вмісту досліджуваних речовин в геосферах, виражено в мг/м^3 [2, 3, 7]:

1) M1 = (340, 1,5, 300) — для CO (літосфера, атмосфера, гідросфера);

2) M2 = (400, 0,3, 1850) — для NO (літосфера, атмосфера, гідросфера);

3) $M3 = (200, 0,1, 950)$ — для SO (літосфера, атмосфера, гідросфера).

Забруднення, спричинене забруднюючим джерелом ТЕЦ–5 станом на 2011 рік можна задати вектором викидів $F(f1,f2,f3)$, виражено в мг/м^3 [3, 6, 8] :

1) $F1 = (750, 66, 4200)$ — для CO (літосфера, атмосфера, гідросфера);

2) $F2 = (210000, 3,36, 30000)$ — для NO (літосфера, атмосфера, гідросфера);

3) $F3 = (750, 9,1, 1150)$ — для SO (літосфера, атмосфера, гідросфера).

Для визначення стану забруднення довкілля через 5 років, скористаємося формулою:

$$U(5) = M \times Q^5 + F + F \times Q + F \times Q^2 + F \times Q^3 + F \times Q^4 + F \times Q^5,$$

де Q_i — матриця, отримана з матриці π_i відкиданням рядка і стовпчика, які відповідають поглинальному стану.

Скориставшись програмним продуктом Mathcad отримаємо наступні розрахунки (розрахунки наведені відповідно до послідовності заданих вище значень):

1) $M1 \times Q1^5 + F1 + F1 \times Q1 + F1 \times Q1^2 + F1 \times Q1^3 + F1 \times Q1^4 + F1 \times Q1^5$ — отримаємо вектор стану забруднення регіону речовиною CO через 5 років $U1(5) = (2190, 137,85, 4940)$. Тобто перша координата вектора $U1 = 2190 \text{ мг/м}^3$ означає концентрацію CO в літосфері, друга координата $U2 = 137,85 \text{ мг/м}^3$ вміст CO в атмосфері, і $U3 = 4940 \text{ мг/м}^3$ — в гідросфері;

2) аналогічно визначимо забруднення середовища по NO — $M2 \times Q2^5 + F2 + F2 \times Q2 + F2 \times Q2^2 + F2 \times Q2^3 + F2 \times Q2^4 + F2 \times Q2^5 = (314200, 221.574, 50810) \text{ мг/м}^3$;

3) та для SO в мг/м^3 —

$$M3 \times Q3^5 + F3 + F3 \times Q3 + F3 \times Q3^2 + F3 \times Q3^3 + F3 \times Q3^4 + F3 \times Q3^5 = (1901, 30,086, 2992).$$

Проведемо розрахунки у програмному пакеті MathCad допустимих значень викидів F від забруднюючого джерела ТЕЦ — 5, які б задовольняли гранично допустимі нормативи (ГДВ), що задані вектором обмежень забруднення q :

$q1 = (1350, 60, 3000)$ — мг/м^3 для CO у літосфері, атмосфері, гідросфері;

$q2 = (120000, 1,2, 10000)$ — мг/м^3 для NO у літосфері, атмосфері, гідросфері;

$q_3 = (400, 10, 1000)$ — мг/м³ для SO у літосфері, атмосфері, гідросфері.

Як бачимо, фактичні викиди CO, SO на сьогоднішній день вже перевищують допустимі концентрації забруднюючих речовин.

1) Розрахунок для оксиду вуглецю:

Задаємо одиничну матрицю E :

$$E := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Задаємо матрицю однокрокового переходу $Q1$:

$$Q1 := \begin{pmatrix} 0,2 & 0,01 & 0,1 \\ 0,1 & 0,005 & 0,2 \\ 0,2 & 0,01 & 0,1 \end{pmatrix}.$$

Обчислюємо фундаментальну матрицю $N1$:

$$N1 := (E - Q1)^{-1} \\ N1 = \begin{pmatrix} 1,288 & 0,014 & 0,146 \\ 0,187 & 1,009 & 0,245 \\ 0,288 & 0,014 & 1,146 \end{pmatrix}.$$

2) Аналогічні обчислення проводимо для NO:

$$Q2 := \begin{pmatrix} 0,3 & 0,0005 & 0,05 \\ 0,4 & 0,05 & 0,4 \\ 0,2 & 0,001 & 0,1 \end{pmatrix} \\ N2 := (E - Q2)^{-1}; \\ N2 = \begin{pmatrix} 1,452 & 8,496 \times 10^{-4} & 0,081 \\ 0,748 & 1,054 & 0,51 \\ 0,324 & 1,359 \times 10^{-3} & 1,13 \end{pmatrix}.$$

хунки. Так, навіть для СО у атмосфері, яке на сьогодні поки що не перевищує норми, значення за прогнозом уже в 5 разів перевищить допустиме. Місцезоположення ТЕЦ дає підставу непокоїтись за здоров'я населення, яке проживає поряд із джерелом забруднення та піддається безпосередньому впливу з боку підприємства.

На сьогодні уже починають відбуватися позитивні зміни стосовно проблематики дослідження. Так, у газеті «Дарниця сьогодні» від 27 лютого 2012 року з'явилася замітка про відвідування Дарницької ТЕЦ прем'єр-міністром Миколою Азаровим, який пообіцяв: «Ми будемо прикладати максимум зусиль, щоб ця станція працювала в безпечнішому екологічному режимі». Планується перехід із вугільного палива на антрацит, у результаті чого 95 % викидів станції локалізується.

Література

1. *Жлуктенко В. І., Наконечний С. І., Савіна С. С.* Стохастичні процеси та моделі в економіці, соціології, екології: Навч. посібник. — К.: КНЕУ, 2002. — 226 с.
2. Наказ Міністерства екології та природних ресурсів від 30.07.2001 №286 «Про затвердження Порядку визначення величини фонових концентрацій забруднюючих речовин в повітрі».
3. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища від 20.07.2009 №389 «Про затвердження методики розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства Про охорону і раціональне використання водних ресурсів».
4. *Назаренко І.І., Польчина С.М., Нікорич В.А.* Грунтознавство. — К.: ЕкоСфера, 2007. — 183 с.
5. *Попов О.О.* Стохастична модель забруднення приземної атмосфери від підприємств паливної енергетики (на прикладі ТЕЦ) // Зб. наук. Праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. — К., 2009. — 12 с.
6. *Нечаєва Н.П., Шульженко С.В., Сас Д.П., Парасюк М.В.* Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля // Проблеми загальної енергетики. Збірник наукових праць. — № 18. — К.: Інститут загальної енергетики НАН України, 2008. — С. 54—60.
7. *В. Тарасова, А.С. Малиновський, М.Ф. Рибак.* Екологічна стандартизація і нормування антропогенного навантаження на природне середовище: Посібник для студентів. — К., 2007. — 242 с.
8. *Кучерявий В.П.* Екологія. — Геохімічне середовище і геохімія навколишнього середовища. Ч. 1: Навчальний посібник. — Львів, 2009. — 240 с.

Стаття надійшла до редакції 26.06.2012 р.