

А. О. Запорожець — канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
Інститут технічної теплофізики НАН України
orcid.org/0000-0002-0704-4116
e-mail: a.o.zaporozhets@nas.gov.ua

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Вступ

Раціональне природокористування передбачає управління природними процесами, тобто запрограмований вплив на природні об'єкти з метою отримання необхідного господарського ефекту. Для того, щоб управління було досить ефективним, необхідно мати дані про динамічні властивості цих об'єктів, їх зміну в результаті антропогенного впливу, передбачити наслідки втручання людини в хід природних процесів.

Так, сучасний стан вирішення проблем довкілля, не можна вважати задовільним. Проблема дослідження навколишнього середовища має велику кількість напрямів, кожен з яких характеризується певною специфікою [1–2].

Най-більшого розвитку в Україні набув напрям дослідження довкілля об'єктів енергетики, в першу чергу об'єктів комунальної та промислової теплоенергетики.

У рамках цього напрямку сформовані державні програми, проводяться актуальні і важливі дослідження [3–4].

Поточний стан технічного обладнання об'єктів теплоенергетики, що в основному відпрацювали свій ресурс, вимагає створення нових систем моніторингу для дистанційного контролю повітря навколо цих об'єктів. Це викликано як необхідністю безпосереднього контролю стану функціонування теплогенеруючих пристроїв (режими спалювання палива прямо впливають на склад продуктів спалювання), так і прогнозування поширення шкідливих речовин в різних шарах атмосфери, що утворюються в процесі їх функціонування.

Проведення пов'язаних з цим досліджень потребує використання сучасних досягнень науки і техніки, новітніх інформаційно-вимірювальних комплексів, а їх ефективність залежить від рівня розробки та практичного використання апаратно-програмних засобів вимірювальних систем.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Об'єкти промислової та комунальної теплоенергетики (ТЕЦ, ТЕС, котельні тощо) відносяться до кола критично важливих та потенційно небезпечних об'єктів. Виконання міжнародних та державних програм по захисту навколишнього середовища і особливо середовища в районах розміщення потенційно екологічного небезпечних підприємств, в тому числі і об'єктів енергетики, вимагає проведення постійного моніторингу стану довкілля [4–5]. Крім того, організація такого моніторингу є важливою ланкою в переліку заходів щодо підтримки енергетичної безпеки України [4, 6].

У працях [7–10] розглянуто системи, побудовані на базі стаціонарних наземних пунктів контролю. Їх розташування здійснюється з урахуванням екологічних особливостей місцевості, типу ландшафту, метеорологічних умов, характеристик джерел потенційних загроз у сукупності з економічними та фізики-технічними чинниками. Розробка та експлуатація таких систем є не завжди виправданою з ряду причин. Серед них: неможливість визначення рівня забруднення повітря на різній висоті від джерела забруднення, обмеженість даних, недостатня кількість точок вимірювань для визначення небезпечних полів концентрацій і отримання інформації про рівень забруднення, недостатня швидкість реагування стаціонарних систем при виникненні надзвичайної ситуації.

Таким чином, актуальним на даний час в теплоенергетиці є проблема розроблення моніторингового комплексу стану забруднення повітря навколишнього середовища, що базується на використанні безпілотних авіаційних комплексів.

Мета та завдання дослідження

Мета проведених досліджень — встановити підходи до розроблення моніторингового комп-

лексу стану забруднення повітря навколишнього середовища на базі безпілотних авіаційних комплексів з визначенням просторових концентраційних полів шкідливих речовин у різних шарах атмосфери. Для цього ставляться такі завдання:

– провести аналіз забруднюючих речовин, що утворюються в процесі експлуатації об'єктів теплоенергетики, та дослідити можливості їх детектування;

– дослідити підходи до розрахунку поширення шкідливих речовин в повітрі від точкових джерел забруднення;

– розглянути особливості функціонування автоматизованих систем контролю забруднення повітря та дослідити їх поширення в світі;

– розробити підхід до моніторингу стану повітря навколишнього середовища на базі безпілотних авіаційних комплексів.

Шкідливі речовини в продуктах спалювання палива. Вид палива впливає на склад

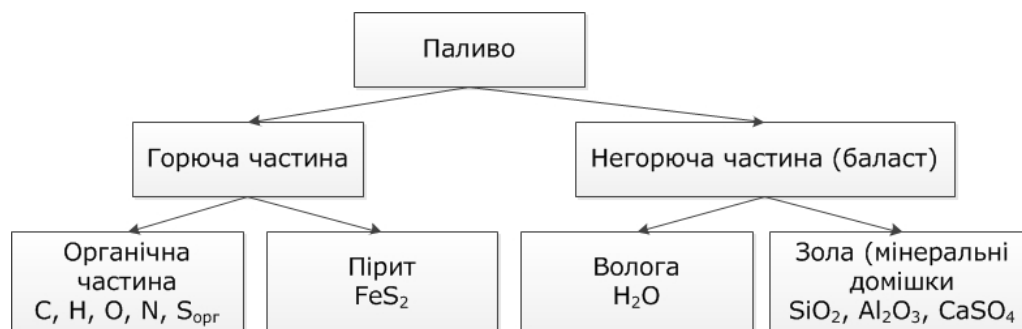


Рис. 1. Структура складу твердого палива

До рідких палив, що використовуються в теплоенергетиці, належать мазут, сланцеве масло, дизельна та котельно-пічне палива. В рідкому паливі відсутня піритна сірка. До складу золи мазуту входять V_2O_5 , Ni_2O_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO та інші оксиди. Зольність мазуту не перевищує 0,3 %. При повному його спалюванні вміст твердих частинок у відхідних газах становить близько $0,1 \text{ г/м}^3$.

Сірка у мазуті знаходиться переважно у вигляді органічних сполук, «чистої» сірки та сірководню. Її вміст залежить від сірчистості нафти, з якої його виготовлено.

Дизельне паливо за вмістом сірки прийнято поділяти на 2 групи: 1 — до 0,2 % та 2 — до 0,5 %. У малосірністому котельно-пічному паливі вміст сірки не перевищує 0,5 %, у сірністому — до 1,1; у сланцевому маслі — не більше 1 %.

Газоподібне паливо є найбільш «чистим» органічним паливом, і під час його спалювання можуть формуватися тільки оксиди азоту та оксид вуглецю CO (при неповному спалюванні). Детальніше про механізми утворення продуктів

шкідливих речовин, що формуються після його спалювання. На електростанціях використовується тверде, рідке та газоподібне паливо. Основними шкідливими речовинами, що знаходяться в складі відхідних газів котлів, є: оксиди сірки (SO_2 та SO_3), оксиди азоту (NO та NO_2), оксид вуглецю (CO), сполуки ванадію (переважно пентаксид ванадію V_2O_5). До шкідливих забруднювачів відноситься також зола.

До твердого палива, що використовується в теплоенергетиці, належать вугілля (буре, кам'яне, антрацит), горючі сланці і торф.

Схематичний склад твердого палива зображено на рис. 1.

Як видно з рисунка, органічна частина палива складається з вуглецю C, водню H_2 , кисню O_2 , органічної сірки S. Мінеральна частина палива складається з води W та золи A. Основна частина мінеральної складової палива переходить в процесі спалювання в летючу золу.

хімічного недопалу при спалюванні природного газу наведено в працях [11; 12].

Шкідливі викиди та природні речовини в атмосфері піддаються складним процесам трансформації: перетворення, взаємодії, вимиванню і т. п. Ці процеси є відмінними для твердих та газоподібних домішок. На процес розсіювання викидів в атмосфері, що надходять із димових труб та вентиляційних пристроїв, істотний вплив мають такі фактори:

- стан атмосфери;
- фізичні і хімічні властивості речовин, що входять до складу викидів (щільність, температура газу, дисперсний склад пилу та ін.);
- висота і діаметр джерела викиду;
- розташування джерел викиду;
- рельєф місцевості.

Схематичний розподіл концентрації забруднюючих речовин в атмосфері під факелом високого точкового джерела зображено на рис. 2

Усередині зони перекидання факела високі концентрації речовин мають місце за рахунок неорганізованих викидів.

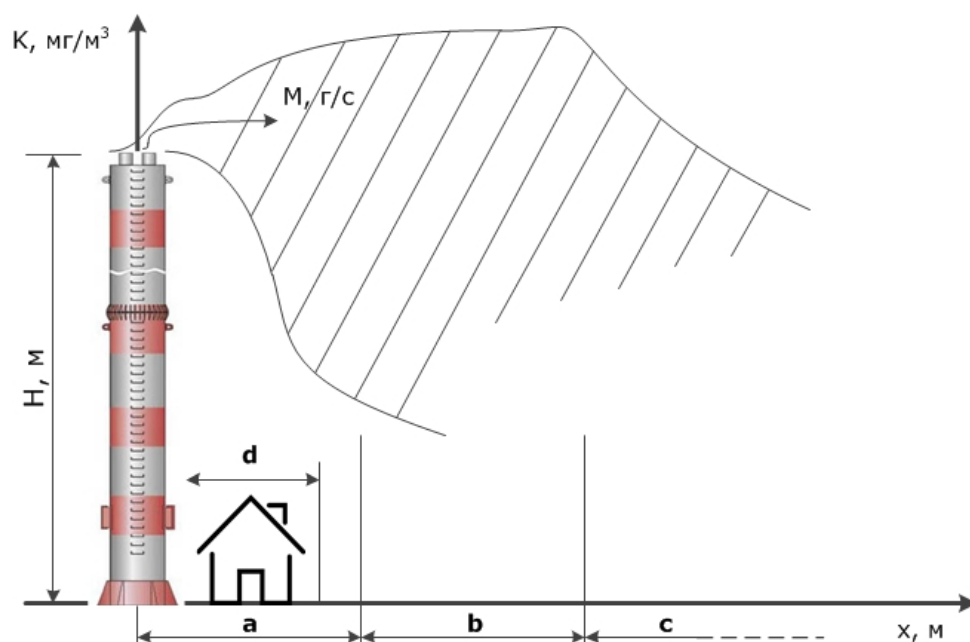


Рис. 2. Схематична зміна розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері під факелом точкового джерела:
a — зона перекидання факела; *b* — зона задимленості; *c* — зона зниження рівня забруднення;
d — зона забруднення неорганізованими викидами

Зона задимлення є найбільш небезпечною, її розміри залежно від метеоумов знаходяться в межах 10–50 висот димової труби. Максимальна концентрація забруднюючої речовини K в приземному шарі атмосфери прямо пропорційна масовій витраті забруднюючої речовини M і обернено пропорційна квадрату висоти джерела H^2 .

Висока концентрація в атмосферному повітрі різних забруднювачів негативно впливає на увесь комплекс живої природи. Негативний вплив шкідливих домішок в атмосфері виявляється в погіршенні здоров'я людей та тварин, зниженні урожайності сільськогосподарських культур. Забруднення атмосфери також впливає на корозійні процеси будівельних конструкцій, прискорення зношення будівель та обладнання.

В атмосферу потрапляють не тільки шкідливі викиди з ТЕС, але і інших промислових підпри-

ємств, транспорту, комунальних служб. В табл. 1 наведено розподіл викидів шкідливих речовин в атмосферу від об'єктів різних сфер промисловості [13]. Як видно із наведених даних, в забрудненні атмосферного повітря головну роль відіграють об'єкти теплоенергетичної, металургійної та транспортної промисловості. Їх сумарний вклад в забруднення навколишнього середовища становить близько 2/3 сумарних шкідливих викидів промисловості.

Кількість допустимої концентрації шкідливих речовин для людини в навколишньому середовищі визначається на основі 2-х показників ГДК (граничнодопустимої концентрації): максимально-разової (ГДК_{м.р}) та середньодобової (ГДК_{с.д}) на рівні дихання. ГДК шкідливих речовин, що продукується об'єктами теплоенергетичної галузі, представлені в табл. 2.

Таблиця 1

Співвідношення викидів шкідливих речовин в атмосферу між галузями промисловості

Об'єкти та сфери промисловості	Частка викидів шкідливих речовин в атмосферу, %
ТЕС та котельні	27
Чорна металургія	17
Нафтовидобуток та нафтохімія	16
Автомобільний транспорт	12
Кольорова металургія	10
Будівельна промисловість	5
Вугільна промисловість	2,5
Хімічна промисловість	1,5
Інші галузі	9
Всього:	100

Таблиця 2

Значення ГДК для деяких речовин на рівні дихання людини

Речовина	Хімічна формула	ГДК _{м.р.}	ГДК _{с.д.}
Діоксид азоту	NO ₂	0,085	0,04
Оксид азоту	NO	0,6	0,06
Діоксид сірки	SO ₂	0,5	0,05
Бензапірен	C ₂₀ H ₁₆	—	10 ⁻⁶
Пентакислванадія	V ₂ O ₅	—	0,002
Оксид вуглецю	CO	5	3
Аміак	NH ₃	0,2	0,04
Сірководень	H ₂ S	0,008	—
Сажа	—	0,15	0,05
Неорганічний пил, що містить діоксин кремнія, %			
>70	—	0,15	0,05
20–70	—	0,3	0,1
<20	—	0,5	0,15
Вугільна зола ТЕС	—	0,05	0,02

Моделювання розповсюдження викидів

Методики прогнозування забруднення атмосферного повітря базуються на результатах теоретичних та експериментальних досліджень закономірностей розповсюдження домішок, що продукуються джерелами забруднення атмосфери [14–15].

Аналіз поширення шкідливих домішок базується на розробці теорії атмосферної дифузії на основі математичного опису процесу за допомогою рівняння турбулентної дифузії. Воно дозволяє проводити дослідження розповсюдження домішок від джерел різного типу та за різних характеристик навколишнього середовища. В загальному вигляді задача прогнозування забруднення повітря навколишнього середовища може бути визначена як рішення за певних початкових та граничних умов диференційного рівняння:

$$\sum_{i=1}^3 v_i \frac{\partial K}{\partial x_i} + \frac{\partial K}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} C_i \frac{\partial K}{\partial x_i} - aK, \quad (1)$$

де v_i — середня швидкість переміщення домішки; K — концентрація домішки; x — координата; t — час розповсюдження домішки; C_i — складові коефіцієнта обміну; a — коефіцієнт, що визначає зміну концентрації за рахунок трансформування домішки.

У декартовій системі координат рівняння набуває вигляду:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + v_x \frac{\partial K}{\partial x} + v_y \frac{\partial K}{\partial y} + v_z \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} + C_x \frac{\partial K}{\partial x} + C_y \frac{\partial K}{\partial y} + C_z \frac{\partial K}{\partial z} - aK. \quad (2)$$

При розв'язанні практичних задач вигляд рівняння (2) може спрощуватися.

Наприклад, якщо вісь x орієнтована вздовж напрямку середньої швидкості вітру, то $v_x = 0$. При цьому повний перелік допустимих спрощень наведено в праці [14]. Таким чином, рівняння (2) може бути спрощене до вигляду:

$$v_x \frac{\partial K}{\partial x} - v_z \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} C_y \frac{\partial K}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} C_z \frac{\partial K}{\partial z} - aK. \quad (3)$$

У разі розгляду легкої домішки, рівняння розповсюдження забрудника в атмосфері набуває вигляду:

$$v_x \frac{\partial K}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} C_y \frac{\partial K}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} C_z \frac{\partial K}{\partial z} - aK.$$

При дослідженні домішки, що не трансформується в процесі розповсюдження, рівняння (3) має вигляд:

$$v_x \frac{\partial K}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} C_y \frac{\partial K}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} C_z \frac{\partial K}{\partial z}.$$

Зазвичай, при прогнозуванні забруднення повітря, визначають тільки концентрацію шкідливих домішок у приземному шарі, на рівні $h \leq 2$ м. На рівні $z = h$ (у приземному шарі) наближено приймають рівність $C_z = C_0$, де C_0 — коефіцієнт молекулярної дифузії для повітря.

Аналітичний вираз для розв'язання рівняння дифузії можна записати у випадку, якщо v_x та C_z будуть задані степеневими функціями від z ($v_x = v_x^1 \cdot z^n$; $C_z = C_z^1 \cdot z$) для легкої домішки, що не трансформується в процесі розповсюдження. У такому випадку рішення рівняння (1) буде мати вигляд:

$$K = \frac{M}{2(n-1)C_z^1 \sqrt{\pi C_0 x^3}} \cdot e^{-\frac{v_x^1 H^{1+n}}{(1+n)^2 C_z^1 x} - \frac{y^2}{4C_0 x}},$$

де M — викид речовини від джерела в одиницю часу, мг/с; H — висота джерела викиду, м.

Результати теоретичного розрахунку розподілу концентрації шкідливих речовин від точкового джерела зображено на рис. 3. Характерною особливістю розподілу наземної концентрації K вздовж осі x є наявність її максимуму K_m на відстані x_m від джерела. За однакових параметрах викидів максимальна приземна концентрація від більш високого джерела менша та спостерігається на більшій відстані від джерела.

Автоматизовані системи контролю повітря

Загалом, моніторинг атмосферного повітря являє собою спостереження за його станом та попередження про критичні ситуації, що є, чи можуть бути, шкідливими/небезпечними для

здоров'я людей та інших живих організмів. Процеси моніторингу об'єктів енергетики (зокрема ТЕС, котельні тощо) можна проілюструвати структурою [16], наведеною на рис. 4.

У багатьох промислово розвинених країнах та великих індустриальних районах діють автоматизовані системи контролю забруднення повітря (АСКЗП), що представляють собою мережу контрольно-вимірювальних станцій (КВС), обладнаних сенсорами, апаратурою та каналами зв'язку. Дані з КВС надходять до інформаційного центру, де здійснюється збір та обробка даних про рівень забруднення повітря в контрольованих районах [14; 17].

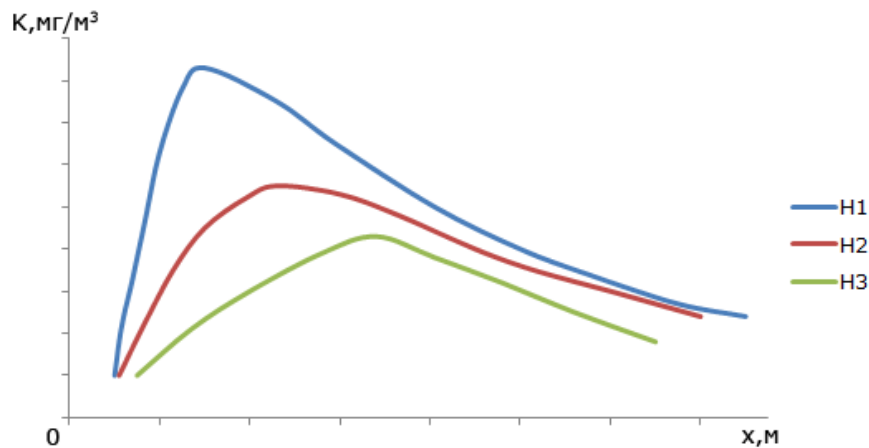


Рис. 3. Теоретичний розподіл концентрації домішок в повітрі K на відстані x від точкового джерела різної висоти H : $H_1 < H_2 < H_3$

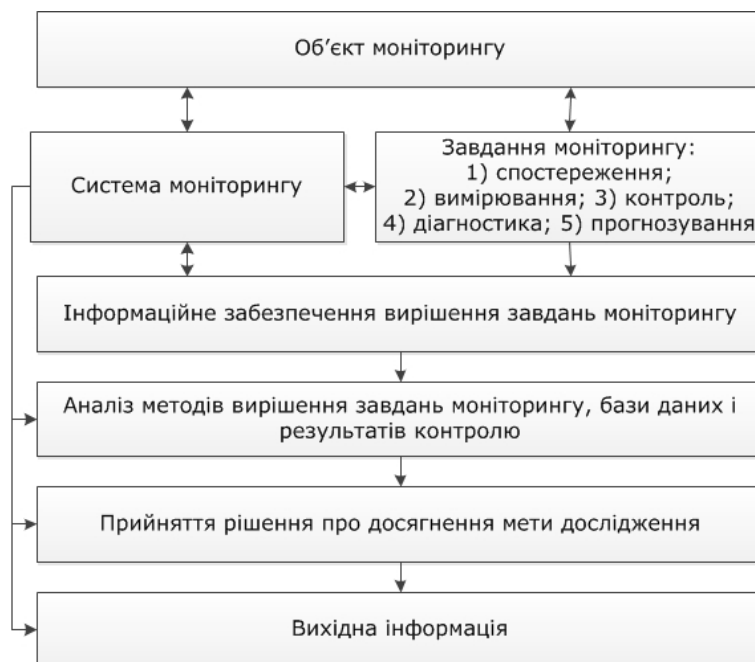


Рис. 4. Структура процесу моніторингу енергетичних об'єктів

Задачі, що дозволяють вирішувати АСКЗП:

- 1) автоматичне спостереження і реєстрація концентрацій забруднюючих речовин;
- 2) аналіз отриманої інформації з метою визначення фактичного стану забруднення повітряного простору;
- 3) прийняття екстрених заходів по боротьбі із забрудненням;
- 4) прогнозування рівня забруднення;
- 5) вироблення рекомендацій для поліпшення стану навколишнього середовища;
- 6) уточнення та перевірка розрахунків розсіювання домішок.

Автоматизовані системи контролю забруднення повітря розраховані на вимірюванні концентрації одного або декількох речовин: CO, NO, NO₂, SO₂, O₃, NH₃, H₂S, CH₄, C₆H₆, C₆H₅CH₃, C₆H₅OH, CH₂O, C₈H₈, C₈H₁₀, HNO₂, C₁₀H₈, O₂, CO₂, PM₁₀, PM_{2,5} (зважені речовини).

Вимірювання даних речовин відбувається низкою специфічних сенсорів, зокрема електрoхімічними, амперметричними, напівпровідниковими, п'єзокварцевими, фотометричними сенсорами з використанням волоконної оптики та індикаторних трубок, біосенсорами, сенсорами на базі поверхнево-активних волокон та ін. Разом з вимірюванням концентрації забруднюючих речовин проводять також вимірювання вологості, температури, тиску, напрямку і швидкості вітру.

На рис. 5 представлена карта з даними, що надходять від АСКЗП в режимі реального часу (за даними www.aqicn.org).

На карті кольором та чисельно відображено індекс якості повітря (від англ. AirQualityIndex, AQI) на території земної поверхні, значення якого використовується для донесення інформації про рівень забруднення навколишнього середовища в даний час.

Більшість шкідливих речовин не пов'язана з індексом якості повітря.

Згідно зі стандартом ЕРА, для визначення індексу AQI можуть використовуватися такі речовини: SO₂, NO₂, CO, O₃, PM_{2,5}, PM₁₀ [18–19].

У табл. 3 наведені діапазони значень концентрацій забруднювальних речовин та відповідні діапазони AQI.

Формула для визначення AQI:

$$I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \cdot (C - C_{\min}) + I_{\min},$$

де I — поточне значення AQI, I_{\max} — максимальне значення AQI для поточного діапазону концентрації забруднюючої речовини; I_{\min} — мінімальне значення AQI для поточного діапазону концентрації забруднюючої речовини; C_{\max} — максимальне значення поточного діапазону концентрації забруднюючої речовини; C_{\min} — мінімальне значення поточного діапазону концентрації забруднюючої речовини; C — поточна концентрація забруднюючої речовини.

У табл. 4 наведені дані про рівень небезпеки, що характеризує кожен з відповідних діапазонів AQI.

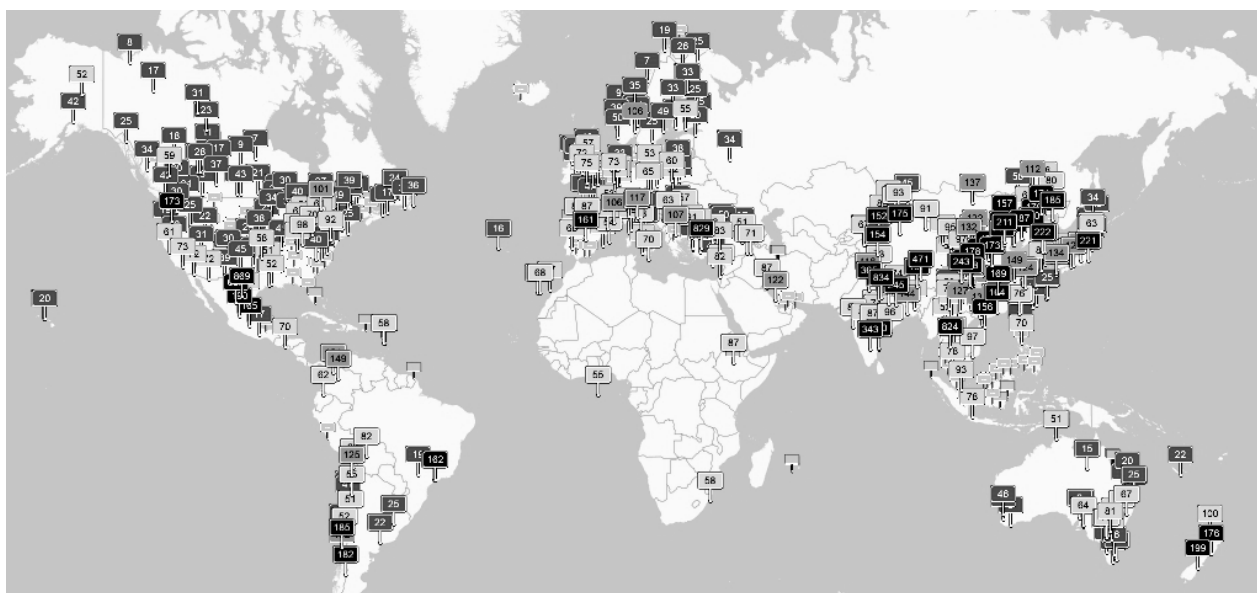


Рис. 5. Візуалізація стану забруднення навколишнього середовища на базі даних, отриманих від АСКЗП у режимі реального часу

Таблиця 3

Діапазони значень AQI та концентрацій забруднюючих речовин в повітрі

AQI	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	CO (ppm)	PM ₁₀ (мкг/м ³)	PM _{2,5} (мкг/м ³)	O ₃ (ppb)
$I_{\min}-I_{\max}$	$C_{\min}-C_{\max}$	$C_{\min}-C_{\max}$	$C_{\min}-C_{\max}$	$C_{\min}-C_{\max}$	$C_{\min}-C_{\max}$	$C_{\min}-C_{\max}$
0–50	0–53*	0–35*	0–4,4**	0–54***	0–12***	0–54**
51–100	54–100*	36–75*	4,5–9,4**	55–154***	12,1–35,4***	55–70**
101–150	101–360*	76–185*	9,5–12,4**	155–254***	35,5–55,4***	71–85** 125–164*
151–200	361–649*	186–304*	12,5–15,4**	255–354***	55,5–150,4***	86–105** 165–204*
201–300	650–1249*	305–604***	15,5–30,4**	355–424***	105,5–250,4***	106–200** 205–404*
301–400	1250–1649*	605–804***	30,5–40,4**	425–504***	250,5–350,4***	405–504*
401–500	1650–1049*	805–1004***	40,5–50,4**	505–604***	350,5–500,4***	505–604*

Примітка: * — усереднене значення концентрації забрудника за 1 год; ** — усереднене значення концентрації забрудника за 8 год; *** — усереднене значення концентрації забрудника за 24 год.

Таблиця 4

Застереження щодо рівнів AQI

AQI	Позначення	Застереження
0–50	Добре	Якість повітря вважається задовільною, забруднення повітря є незначним (у межах норми)
51–100	Задовільно	Якість повітря є прийнятною, але деякі забруднювачі можуть становити небезпеку для людей, які є особливо чутливими до забрудненого повітря
101–150	Погано для чутливих груп	Може спостерігатися ефект на особливо чутливу групу осіб. Без видимого впливу на звичайного мешканця
151–200	Погано	Кожен може відчути наслідки для свого здоров'я. Особливо чутлива група може відчути більш серйозні наслідки
201–300	Дуже погано	Небезпека для здоров'я від надзвичайних ситуацій. Імовірно, спостерігатиметься вплив на все населення
300+	Небезпечно	Небезпека для здоров'я, кожна людина може відчути серйозні наслідки для свого здоров'я

Як видно з рис. 5, на територіях України, Росії, Білорусії та інших країн СНГ майже відсутні АСКЗП, що можуть функціонувати за міжнародними стандартами та продукувати дані про склад повітря навколишнього середовища в режимі реального часу. Існуюча в Україні мережа спостережень за станом забруднення атмосферного повітря включає пости ручного відбору проб повітря та АСКЗП. Пості спостереження можуть бути стаціонарними, маршрутними та пересувними. З постів ручного відбору проби для аналізу доставляються в хімічні лабораторії. АСКЗП є стаціонарними та оснащені пристроями безперервного відбору та аналізу проб повітря і передачі інформації по дротових/бездротових каналах зв'язку в центр управління та регулювання станом атмосферного повітря в заданому режимі.

В Україні та країнах СНД розроблені ряд модифікацій АСКЗП, що можуть функціонувати за

міжнародними стандартами [20–21]. Однак до теперішнього часу не вдалося повною мірою організувати їх серійне виробництво і широке застосування. Серед причин, що призвели до такої ситуації:

- 1) низька експлуатаційна надійність і якість приладів і застосованого газоаналізуючого обладнання;
- 2) дефіцит фінансових і матеріальних ресурсів;
- 3) відсутність необхідної законодавчої бази, відомча роз'єдність.

Система моніторингу забруднення повітря на базі безпілотних апаратів. Процедура моніторингу реалізуються за допомогою різних технічних засобів. В автоматичному режимі такий моніторинг доцільно виконувати в атмосфері, адже в багатьох випадках середовищем існування і поширення різних фізичних полів та радіо-

активних речовин, які характеризують поточний стан об'єктів теплоенергетики є атмосфера. Крім того збір вимірювальної інформації у повітряно-середовищі в околі цих об'єктів можна здійснювати на значних ділянках (від одиниць до сотень кілометрів) дистанційно (тобто без фізичного контакту з об'єктом спостереження) в автоматичному режимі і практично безперервно в часі. Такий контроль може здійснюватись не тільки в штатних режимах, але й на початкових етапах розвитку загроз різного характеру та під час ліквідації аварій на об'єктах енергетики, що становлять потенційну загрозу здоров'ю та життю людини.



а



б

Рис. 6. БАК вертольотного (а) та літакового (б) типів

Недоліком існуючих на даний час систем моніторингу є неможливість визначення рівня забруднення на різній висоті від джерела, обмеженість даних, недостатня кількість точок вимірювання для визначення небезпечних полів концентрацій і отримання інформації про рівні забруднення, невелика швидкість реагування наземних систем при появі надзвичайної ситуації.

Запропонований моніторинговий комплекс може виконувати завдання екологічного моніторингу в районах розташування підприємств мінерально-сировинного комплексу, виявляти порушення санітарно-захисної зони і кордонів земельного відводу промисловими підприємствами. Комплекс включає в себе безпілотні літальні апарати з корисним навантаженням у вигляді вбудованих апаратів що включають в себе газоаналізуючі пристрої, дозиметр, тепловізор тощо. Комплекс може виконувати всі польотні завдання в автоматичному і напівавтоматичному режимах з використанням бездротових систем передачі даних.

Даний продукт є найбільш привабливим і відрізняється від аналогів тим, що в одній системі зібрано максимально можливе обладнання для експрес-оцінки забруднення атмосферного повітря та інших супутніх завдань.

В умовах постійно зростаючого антропогенного навантаження і зростання ризиків техногенних катастроф необхідна модернізація існуючих систем моніторингу повітря навколишнього середовища. Один з перспективних напрямів розвитку систем дистанційного моніторингу пов'язаний з використанням систем авіаційного базування на основі безпілотних авіаційних комплексів (БАК) [22–23]. Для вирішення даного завдання запропонована система екологічного моніторингу забруднення атмосфери за допомогою малогабаритних безпілотних літальних апаратів (рис. 6) вертолітного або літакового типів, оснащених навісним обладнанням, що керується з наземної станції управління.

Узагальнена схема моніторингу стану повітря навколишнього середовища на базі БАК зображена на рис. 7 [16].

У зонах розташування ТЕС чи інших об'єктів теплоенергетики, що продукують шкідливі викиди, за допомогою стаціонарних та мобільних екологічних лабораторій здійснюється періодичний збір проб повітря, води та ґрунту з метою контролю їх забруднення, а також поверхневих і підземних вод, дощових стоків, снігового покривів, донних відкладень водоєм, радіаційної обстановки, метеопараметрів, димових викидів, промислових стоків і скидів тощо [24]. Вся інформація надходить з розгалуженої мережі екологічних постів, лабораторій та різних технологічних сегментів об'єктів теплоенергетики, передається за допомогою дротової/бездротової системи передачі даних і обробляється в інформаційно-аналітичному центрі, що забезпечує інформаційну підтримку управлінських рішень, енергозберігаючих режимів експлуатації об'єктів теплоенергетики, прогнозування та аварійного реагування на нештатні ситуації.

Запропонований моніторинговий комплекс стану забруднення атмосферного повітря на базі БАК вертолітного та літакового типів може застосовуватися для вирішення освітніх, науково-дослідних та прикладних задач.

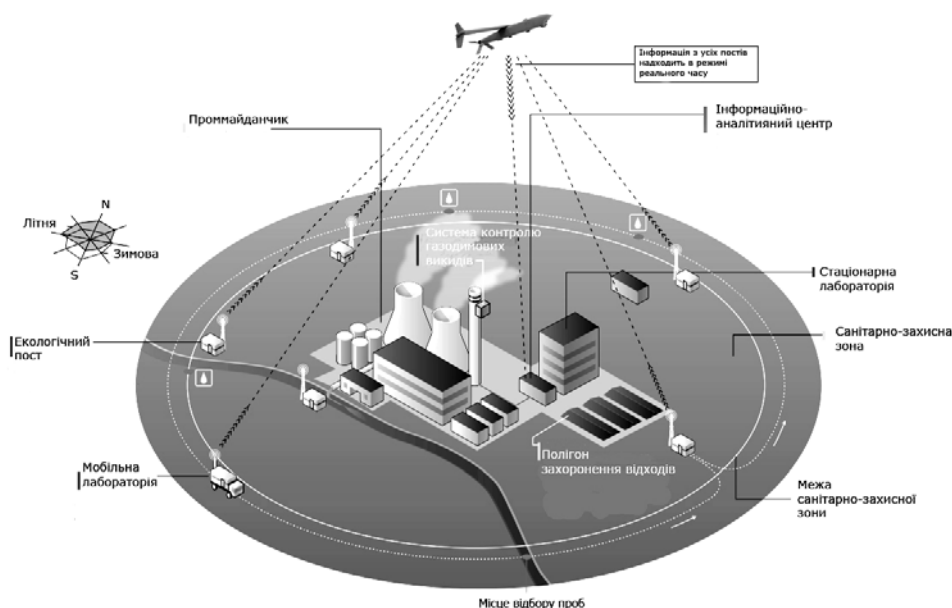


Рис. 7. Узагальнена схема функціонування системи моніторингу забруднення повітря на базі БАК

Комплекс забезпечує проведення дистанційного повітряного моніторингу на висоті від 50 м до 1 км з визначенням концентрацій O_2 , CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2 , H_2S , вимірюванням температури, тиску та вологості в зоні відбору. Взаємозв'язок БАК та наземної станції здійснюється на відстані до 20 км (за умови радіовидимості між ними). Запропонований комплекс зберігає свою працездатність при таких зовнішніх умовах:

- температура навколишнього середовища: $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +35\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- освітленість: не менше 4 лк;
- швидкість вітру: не більше 10 м/с;
- інтенсивність атмосферних опадів (дощ, сніг): не більше 2 мм/год.

Пріоритетним завданням запропонованого моніторингового комплексу є визначення поточної концентрації забруднюючих речовин в повітрі на кількох горизонтальних площинах у діапазоні 0...1000 м з кроком у межах 50–100 м. На цих площинах за попередньо заданою траєкторію (наприклад, по спіралі Архімеда) проводиться велика кількість вимірювань, використання яких дозволяє створювати 3D-моделі перенесення забруднюючих речовин від джерела і ефективно встановлювати зони забруднення на різній відстані від джерела. Це також дасть змогу виявити місця локалізації забруднюючих речовин (спричинених температурною інверсією), що можуть призвести до утворення смогу.

Максимальна відстань польоту БАК від джерела забруднення забезпечує виявлення всіх можливих зон накопичення забруднення від досліджуваного джерела та дозволяє визначити його внесок в фоновий рівень забруднень за межами санітарно-захисної зони.

Висновки

1. Проведено аналіз складу шкідливих викидів від об'єктів комунальної та промислової теплоенергетики, що функціонують на твердому, рідкому та газоподібному паливах. Встановлено, що складу продуктів спалювання палива входять такі речовини як CO , CO_2 , NO_x , SO_x , що створюють найбільший вплив на живі організми біосфери. Дані речовини є газоподібними та добре детектуються стандартними газоаналізуючими пристроями.

2. Встановлено, що методики прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в повітрі лежать у розробці теорії атмосферної дифузії на основі математичного опису процесу за допомогою рівняння турбулентної дифузії. Дані підходи не враховують велику кількість зовнішніх факторів, що впливають на поширення речовин в повітрі (наявність великогабаритних об'єктів, вплив сонячної радіації, рельєф місцевості, наявність та інтенсивність атмосферних опадів тощо). До того ж, вони застосовуються для розрахунку концентрацій шкідливих речовин у межах приземного шару, і не можуть бути використані для визначення рівня забруднення в різних шарах атмосфери.

3. Досліджено особливості функціонування автоматизованих систем контролю забруднення повітря, розглянуто їх задачі. Візуалізовано поширення даних систем в світі. Показано, що частина країн Східної Європи та Центральної Азії незабезпечені автоматизованими системами контролю забруднення повітря, що можуть функціонувати в межах світових стандартів з інформування населення про поточний стан

забруднення повітря навколишнього середовища в різних регіонах країн (зокрема України).

4. Запропоновано моніторинговий комплекс стану забруднення повітря навколишнього середовища, що функціонує на базі безпілотних авіаційних комплексів. Розроблено перелік вимірюваних параметрів природного середовища для дистанційного контролю якості повітря навколишнього середовища в межах об'єктів комунальної та промислової теплоенергетики. Використання запропонованого моніторингового комплексу дозволяє розширити межі екологічного моніторингу, оскільки безпілотні авіаційні комплекси можуть забезпечити об'ємний моніторинг повітряного середовища з високою точністю прямими методами визначення концентрацій забруднюючих речовин.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Варганов А. З.** Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг: [учебник] / А. З. Варганов, А. Д. Рубан, В. Л. Шкуратник. — М.: Изд-во МГТУ: Горная книга, 2009. — 641 с.
2. **Величко О. М.** Екологічний моніторинг: навч. посібник / О. М. Величко, Д. В. Зеркалов. — К.: Науковий світ, 2001. — 205 с.
3. Енергетична безпека України: оцінка та напрями забезпечення / Ю. В. Продан, Б. С. Стогній, С. М. Бевз та ін.; за ред. Ю. В. Продана, Б. С. Стогнія. — К., 2008. — 400 с.
4. **Зубик С. В.** Техноекология. Джерела забруднення і захист навколишнього середовища: навч. посібник / С. В. Зубик. — Львів: Орієна-Нова, 2007. — 400 с.
5. **Бабак С. В.** Мониторинг окружающей среды АЭС с использованием систем видеонаблюдения и измерения мощности экспозиционной дозы на базе беспилотного авиационного комплекса / С. В. Бабак // Системы обработки информации. — 2015. — № 7.— С. 190–194.
6. **Стогній Б. С.** Енергетична безпека України. Світові та національні виклики / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк. — К.: Українські енциклопедичні знання, ТЕКСТ, 2006. — 408 с.
7. **Бабак С. В.** Задачи создания систем мониторинга окружающей среды объектов энергетики / С. В. Бабак // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сб. трудов. — К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2015. — С. 133–136.
8. **Заславская Н. М.** Проблемы построения современной функциональной организации государственного экологического контроля / Н. М. Заславская // Экологическое право. — 2010. — № 3. — С. 17–23.
9. **Черных Н. А.** Экологический мониторинг токсикантов в биосфере / Н. А. Черных, С. Н. Сидоренко. — М.: РУДН. — 2003. — 430 с.
10. **Демиденко Г. А.** Экологический мониторинг загрязнения окружающей среды формальдегидом и бенз(а)пиреном / Г. А. Демиденко, Д. Ф. Жирнова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2013. — № 10. — С. 109–113.
11. **Запорожець А. О.** Комп'ютеризована система контролю процесу спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності: дис. канд. техн. наук: 05.13.05 / Запорожець Артур Олександрович. — К., 2017. — 182 с.
12. **Бабак В. П.** Система якості горіння повітряно-паливної суміші в котлоагрегатах малої та середньої потужності / В. П. Бабак, А. О. Запорожець // Методи та прилади контролю якості. — 2014. — №2(33). — С. 106–114.
13. **Жабо В. В.** Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС: учебник для техникумов. — М.: Энергоатомиздат. — 1992. — 240 с.
14. **Бекетов В. Е.** Конспект лекций по разделу «Рассеивание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и методики расчета приземных концентраций» к дисциплине «Инженерная аэрокология городов» (для студентов 5 курса дневной и 5–6 курсов заочной форм обучения специальности 7.070801, 8.070801, 7.04010601, 8.04010601 «Экология и охрана окружающей среды») / В. Е. Бекетов, Г. П. Евтухова, Ю. Л. Коваленко; Харьк. нац. акад. город. хоз-ва. — Х.: ХНАГХ, 2011. — 74 с.
15. **Беляев Н. Н.** Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. — Д.: Акцент ПП, 2014. — 127 с.
16. **Бабак С. В.** Комп'ютеризовані системи контролю довкілля об'єктів енергетики на базі безпілотних авіаційних комплексів: дис. докт. техн. наук: 05.13.05 / Бабак Сергій Віталійович — Київ, 2016. — 328 с.
17. **Бельдеева Л. Н.** Экологический мониторинг: учеб. пособие / Л. Н. Бельдеева. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. — 122с.
18. **Dockery D. W.** Acuter aspiratory effects of particulate air pollution/ D. W. Dockery, C. A. Pope // Annual review of public health. — 1994. — Vol. 15. — №. 1. — P. 107–132.
19. **Wallace E. O.** The net benefits of incentive-based regulation: a case study of environmental standard setting / E. O. Wallace, P. R. Portney, A. M. McGartland // The American Economic Review. — 1989. — Vol. 79. — №. 5. — P. 1233–1242.
20. **Плотнікова О. К.** Моніторинг навколишнього середовища: конспект лекцій для студентів енергетичного інституту фаху 8.07.08.01 — екологія й охорона навколишнього середовища. — Оdesa: Наука і техніка, 2005. — 104 с.
21. **Дзендзелюк О.** Автоматизована система моніторингу параметрів довкілля / О. Дзендзелюк, І. Мусійчук, В. Рабик // Теоретична електротехніка. — 2010. — № 61. — С. 90–98.

22. **Смирнов Ю. Д.** Разработка беспилотных летательных аппаратов для проведения экологического мониторинга / Ю. Д. Смирнов, О. С. Добрынин // Записки Горного института. — 2014. — Т. 207. — С. 213–216.

23. **Пат. 2471209**, Російська Федерація, МПК G01W1/00. Способ мониторинга атмосферного

воздуха / Пашкевич М. А., Смирнов Ю. Д., Кремчеев Э. А., Корельский Д. С.; заявл. 29.07.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

24. **Погребенник В.** Екологічний моніторинг: концепції, принципи, системи / В. Погребенник, М. Мельник, М. Бойчук // Вимірвальна техніка та метрологія. — 2005. — № 65. — С. 164–171.

Запорожець А. О.

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Розглянуто особливості проведення моніторингу забруднення повітря навколишнього середовища. Проведено аналіз шкідливих речовин, що утворюються під час спалювання різних типів палив на теплогенеруючих об'єктах. Досліджено підходи до моделювання розповсюдження викидів об'єктами теплоенергетики в приземному шарі. Розглянуто особливості функціонування автоматизованих систем контролю забруднення повітря в різних країнах світу. Запропоновано підхід до моніторингу забруднення повітря навколишнього середовища на базі безпілотних авіаційних комплексів, наведено його переваги.

Ключові слова: моніторинг забруднення повітря, безпілотні авіаційні комплекси, автоматизовані системи контролю забруднення повітря.

Запорожець А. А.

АНАЛИЗ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В статье рассмотрены особенности проведения мониторинга загрязнения воздуха окружающей среды. Проведен анализ вредных веществ, образующихся при сжигании различных типов топлив на теплогенерирующих объектах. Исследованы подходы к моделированию распространения выбросов объектами теплоэнергетики в приземном слое. Рассмотрены особенности функционирования автоматизированных систем контроля загрязнения воздуха в разных странах мира. Предложен подход к мониторингу загрязнения воздуха окружающей среды на базе беспилотных авиационных комплексов, приведены его преимущества.

Ключевые слова: мониторинг загрязнения воздуха, беспилотные авиационные комплексы, автоматизированные системы контроля загрязнения воздуха.

Zaporozhets A. O.

ANALYSIS OF MEANS FOR MONITORING AIR POLLUTION IN THE ENVIRONMENT

The features of air pollution monitoring in the environment are considered in the article. Harmful substances that formed during the combustion of various types of fuels on heat generating objects are analyzed. Approaches to simulation of emission distribution by thermal power facilities in the surface layer are investigated. Features of the functioning of automated air pollution control systems in different countries of the world are considered. The approach to monitoring ambient air pollution based on unmanned aerial systems was proposed, and its advantages are showed.

Keywords: air pollution monitoring, unmanned aerial systems, automated air pollution control systems.