



Л. С. Сікора, Н. К. Лиса, Н. А. Хияк

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ КИСНЕВО-ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ЗАБРУДНЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Проаналізовано сучасний етап розвитку виробництва електроенергії, хімічної, машинобудівної, поліграфічної продукції, для якого характерне використання широкої гами ресурсних компонент – вугілля, нафти, газу, фарб, полімерів, які є екологічно агресивними. Напружені виробничі режими, що диктуються ринком, призводять до стрімкого збільшення споживання ресурсів для енергоактивних виробничих процесів, зумовлюючи, водночас, збільшення концентрації викидів пилу і шкідливих газів і рідин в атмосферу й водне середовище. Це спричиняє підвищення екологічного забруднення навколишнього середовища, стан якого не завжди можна оперативним чином оцінити в реальному часі за складності відбору даних стандартними методами та оцінити загрози ситуації. Вирішення завдання комплексного екомоніторингу та розроблення оптимальних стратегій управління технологічними режимами, які забезпечили б високу продуктивність і мінімізували шкідливі викиди, ґрунтується на сучасних системних й інформаційних технологіях, створенні нових типів сенсорів для інформаційно-вимірювальних систем. Опрацювання технологічних даних є основою формування оцінювання образу екологічної ситуації та стану виробництва для ухвалення рішень. Відбір додаткових даних про екологічні забруднення потрібно доповнювати даними зі залученням експертних знань, що відповідно дає інформаційну базу для визначення рівня загроз викидів забруднювальних компонент виробництва в екосистему і потребує розроблення нових методів захисту та екомоніторингу. Для контролю технологічного стану виробничих процесів і екологічного середовища потрібно мати комплекс інформаційно-вимірювальних систем, які забезпечують відбір різномірних даних від об'єктів та екологічного середовища, оцінювання параметрів стану, інформаційні технології для інтерпретації образів ситуацій, сформульованих із блоків відібраних термінальних даних і виявлення їх інтелектуального змісту щодо цільового стану техногенного виробничо-екологічного комплексу. Важливою особливістю цього проблемного завдання є пошук методів реєстрації даних і їх довготривале зберігання щодо нормальних і аварійних ситуацій, тому що без вирішення цієї проблеми в часі втрачаються дані, інженерні знання про способи ліквідації загроз й аварій, методів ухвалення ефективних протиаварійних рішень і способів ліквідації наслідків аварій та катастроф у техногенних і соціально-комунальних структурах екологічної регіональної системи.

Ключові слова: екосистема; атмосфера; пил; інформаційні технології; контроль; лазери; безпека довкілля; сенсори; вимірювання; концентрація забруднення; шкідливі речовини.

Вступ / Introduction

Через посилення вимог до якості довкілля, що спираються на міжнародні угоди, стандарти ISO та національні нормативи України (закони Верховної Ради та укази Президента), потрібно розробити нові методи ефективного контролю технологічних процесів на підприємствах, які утворюють шкідливі викиди, а також модернізувати системи управління для зменшення обсягів викидів грубо- та дрібнодисперсного пилу і шкідливих газів, що є відходами виробничих процесів в енергетиці, целюлозно-паперовій та інших галузях промисловості, нафто-газовому секторі.

Для якісного моніторингу стану екологічного середовища техногенної інфраструктури необхідно використовувати прилади та системи для оцінювання хімі-

чного складу, концентрації газових і пилових викидів, а також ступеня їхнього впливу на атмосферне повітря та водне середовище.

Проблемне завдання екологічного моніторингу, для свого вирішення, потребує відповідного комплексування приладів і інформаційно-вимірювальних систем з різними типами сенсорів, які реагують на концентрацію пилу і хімічний склад шкідливих викидів у середовище. Для вирішення проблеми екомоніторингу необхідно вирішити такі проблемні завдання та методи:

1. Методи розроблення оптоелектронних і лазерних сенсорів для контролю концентрації викидів газів і пилу в повітрі і вод.
2. Методи розроблення лазерних систем для дистанційного контролю концентрації шкідливих викидів у середовищі на енергоактивних агрегатних об'єктах.

Інформація про авторів:

Сікора Любомир Степанович, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: Issikora@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7446-1980>

Лиса Наталія Корнеліївна, д-р техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: lysa.nataly@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5513-9614>

Хияк Назарій Андрійович, аспірант, кафедра автоматизації комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки.

Email: nazar.hilyak@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-2431-1514>

Цитування за ДСТУ: Сікора Л. С., Лиса Н. К., Хияк Н. А. Інформаційні та лазерні технології оцінювання киснево-вуглецевого балансу забруднення екологічного середовища. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 8. С. 142–159.

Citation APA: Sikora, L. S., Lysa, N. K., & Khylyak, N. A. (2024). Information and laser technologies for assessing the oxygen-carbon balance of environmental pollution. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(8), 142–159. <https://doi.org/10.36930/40340817>

- Завдання моніторингу повною мірою не розв'язані, тому розроблення засад створення лазерних сенсорів з відповідним інформаційним забезпеченням відбору даних про стан об'єкта – актуальна науково-прикладна проблема в комплексі підвищення ефективності виробництва та захисту екосередовища.
- Завдання створення переносних комплексів і інформаційно-вимірювальних систем для контролю пилу в атмосфері міст, сіл та технологічного середовища і приладів для оцінювання їх концентрації та хімічного складу з використанням лазерних і інформаційних технологій є актуальними в проблемі екомоніторингу.
- Методи, алгоритми і завдання оброблення даних про стан середовища на підставі прямих і опосередкованих методів, методів лазерного зондування фізико-хімічних і оптикогальванічних сенсорів, як підставу для оцінювання рівня екологічної безпеки та ризиків.

Об'єкт дослідження – оцінювання киснево-вуглецевого балансу забруднення екологічного середовища.

Предмет дослідження – методи відбору та оброблення даних від лазерних сенсорів концентрації викидів продуктів згорання в пилопроводах енергоблока, шкідливих викидів газу і пилу в атмосферу техногенними системами, транспортом, будівництвом, що дасть змогу оцінити рівень концентрації пилу і хімічного складу газів як відходів виробництва.

Мета роботи – оцінити на підставі інформаційних і лазерних технологій стан екологічного середовища техногенного виробництва, яке є джерелом шкідливих викидів пилу і газу в атмосферу і водне середовище, їх хімічний склад і концентрацію, що дасть можливість визначити рівень загроз довкіллю.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- На підставі системного методу аналізу розробити комплексну концепцію екомоніторингу техногенних середовищ, щоб розробити ефективні стратегії мінімізації негативного впливу техногенних факторів на навколишнє середовище;
- Проаналізувати наявні методи і засоби побудови інформаційно-вимірювальних систем та сенсорів для відбору даних про стан енергоактивних технологічних об'єктів і рівень концентрації шкідливих викидів в екосередовище (атмосферу, ґрунти, водойми та ріки), щоб забезпечити своєчасне виявлення та оцінювання потенційних екологічних ризиків.
- Розвинути методи формування потоків даних від сенсорів для АСУ й експертів, зважаючи на структуру енергоактивного агрегованого об'єкта, що необхідно для інтерпретації термінальної ситуації критичних забруднень.
- Розробити інформаційну технологію створення лазерних концентратомірів для контролю технологічних викидів пилу і газів у зовнішнє екосередовище як базису створення систем захисту в разі надзвичайних ситуацій.
- На підставі інформаційних технологій обґрунтувати методи розроблення переносних аналізаторів концентрації пилу та складу компонент повітря і газу та води на підставі оптикогальванічних і лазерних сенсорів та мікроелектронних систем, що забезпечить високу точність вимірювань, оперативність отримання результатів і мобільність використання пристроїв у різних умовах.
- Провести системний аналіз та оцінити шкідливий вплив викидів на життєдіяльність суспільства, його просторовий розподіл у районі функціонування виробничої техногенної інфраструктури прогнозу надзвичайних ситуацій, які уможливають розроблення заходів з мінімізації екологічних ризиків, адаптації інфраструктури до потенційних змін і запобігання надзвичайним ситуаціям.
- Розвинути методи й алгоритми опрацювання екологічних даних про рівень забруднення атмосфери і води, та

на підставі отриманих результатів лазерної діагностики й опосередкованих вимірювань поля концентрації, оцінити рівень ризиків настання надзвичайних ситуацій у разі перевищення рівня шкідливих викидів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз досліджень з проблеми оцінювання забруднення екологічного середовища техногенної інфраструктури та літературних джерел з проблеми моніторингу атмосфери та ґрунтів, вод має комплексний характер.

У роботі [44] проаналізовано екологічну ситуацію, яка з плином часу та розвитком глобальної індустріалізації погіршується стрімкими темпами. Також зазначено, що одним із основних параметрів навколишнього середовища вважають чистоту повітря, яка вимірюється значенням AQI (англ. *Air Quality Index*), показник якості повітря, параметр, що використовується для повідомлення громадськості про рівень забруднення повітря у певний момент часу.

У роботі [53] наведено результати моніторингу навколишнього середовища із використанням пристрою з модулями закритої системи вимірювання на підставі mesh-мережі. У монографії [11] досліджено особливості застосування переносних сенсорів з мікропроцесорами для виявлення забруднення середовищ.

У роботах [27, 35, 36, 40] розглянуто проблеми створення інформаційно-вимірювальних систем для контролю технологічних процесів і середовища, оброблення даних на підставі прямих і опосередкованих методів вимірювання рівня концентрації компонент з використанням вимірювальних систем і приладів для підвищення ефективності і достовірності вимірювань для ухвалення протиаварійних рішень. У статтях [1, 41, 42, 43] розглянуто методи комплексних вимірювань для оцінювання стану енергоблоків ТЕС на підставі методу лазерного зондування та їх опрацювання для оцінювання ситуації у технічних системах.

У монографіях [46, 49, 50, 51] обґрунтовано сучасні методи виконання метрологічних робіт для перевірки шкал приладів і систем та оцінювання достовірності згідно з нормативами ДСТУ для контролю технологічних середовищ у процесі функціонування енергоактивних технологічних блоків. Також розглянуто сучасні методи та інформаційні технології планування вимірювальних експериментів у складних системах.

У роботах [5, 12, 13, 14] розглянуто фізичні та хімічні, оптикоелектричні концепції теорії синтезу мікроелектронних сенсорів для відбору даних під час експериментальних досліджень технологічних систем. Обґрунтовано методи використання спеціалізованих приладів для автоматичного контролю викидів шкідливих продуктів згорання теплових електричних станцій (ТЕС) та методи санітарно-екологічного контролю й аналізу забруднювальних речовин в атмосфері, воді і ґрунті, які формуються в техногенних системах.

У монографіях [18, 19, 20, 24, 29, 54, 55] викладено результати фундаментальних досліджень з безпеки екологічних систем, методи моніторингу, контролю, нормативні дані, методи оброблення комплексних даних і інтерпретацій. Обґрунтовано методи та теоретичні засади проведення експериментів, теорію і методику фізичних вимірювань, статистичні методи оброблення отриманих даних, стійкі оцінювання параметрів.

У роботах [4, 30, 31, 48] розглянуто проблеми глобального рівня охорони екологічного середовища, мо-

делі стійкості світової екологічної інфраструктури, проблеми клімату та майбутнього землі на міжнародних форумах.

У фундаментальних монографіях [28, 32, 33, 34, 37] розглянуто базові методи лазерних технологій для спектроскопії та фотохімії у прикладних і наукових дослідженнях в галузі експериментальної фізики. Також обґрунтовано теорію вимірювальних систем, метрологію, методи оброблення даних і їх інтерпретацію та використання математичних методів у хімічній технології та хімічних експериментальних дослідженнях.

У монографіях [21, 38, 39] обґрунтовано проблеми захисту довкілля та системний аналіз для управління якістю води, ґрунтів, екосередовища, нормативи. Також висвітлено створення лазерних інформаційно-вимірювальних систем для контролю технологічних процесів і управління у структурі систем автоматизованого керування в енергетиці та сільськогосподарській промисловості, здійснено дослідження екологічного середовища та оцінювання концентрації шкідливих технологічних викидів.

У монографіях [3, 4, 22, 23, 25, 52] розглянуто основні концепції інформаційних і лазерних технологій відбору й оброблення даних від енергоактивних об'єктів технологічних структур та екологічних систем, водного та техногенного середовища, які характеризують їх динамічний стан. Обґрунтовано та проаналізовано логічні та системні особливості оброблення даних і їх інтерпретацію у процесах ухвалення управлінських рішень за умов високого рівня ризику.

З огляду на інтенсивні бойові дії та використання потужних бомб і ракет, що призводить до викидів потоків шкідливих газу та пилу, опираючись на наші багаторічні дослідження, автори ініціювали це дослідження як основу для прогнозу майбутньої зміни клімату та оцінювання ризиків для життя суспільства як на території України зокрема, так і світу загалом.

Матеріали та методи дослідження. Опис потенційно небезпечних об'єктів з агрегованою ієрархічною просторово розподіленою структурою ґрунтується на основних положеннях теорії управління. Він доповнюється системним аналізом процесів управління енергоактивними об'єктами, а також використанням математичної логіки і теорії ухвалення рішень для розроблення ефективних стратегій координаційного управління в умовах загроз, що впливають на режими функціонування об'єктів навантаження, та атак на всіх рівнях ієрархії.

Окрім цього, застосовують положення теорії експертних систем для оцінювання ситуації та класифікації даних про стан екологічного середовища навколо об'єкта. Використано методи теорії лазерного дистанційного зондування для розроблення фотометрів та інформаційно-вимірювальних систем, призначених для збирання й оброблення даних про концентрацію пилу в атмосфері та водних середовищах.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Теоретичні основи дослідження впливу техногенних систем на стан екосередовища та результати проведення експериментів. Моніторинг техногенних забруднень екосередовища та їх шкідливий вплив на киснево-вуглецевий баланс глобальної атмосфери має велике значення для людей, що проживають поблизу джерел забруднення. Для ефективного забезпечення

якості життєвого простору суспільства в розподіленій техногенній інфраструктурі з комплексом різного типу виробництв (енергетика, транспорт, нафтогазова промисловість, будівельне виробництво, комунальні структури) потрібен комплексний метод контролю стану екологічного середовища та рівень забруднення атмосфери, ґрунтів і вод промисловими підприємствами.

Для визначення якості моніторингу екосередовища просторово розподіленої техногенної інфраструктури необхідно сформулювати базові концепції як процесу його забруднення, так і відповідного наявного комплексу приладів, засобів відбору проб, методів аналітичного аналізу складу компонент, методів оброблення даних і їх інформаційної інтерпретації щодо рівня загроз і ризиків.

Виробнича техногенна інфраструктура є комплексним інтенсивним забруднювачем не тільки атмосфери, ґрунтів, рік, водосховищ, зелених насаджень міст і сіл, а й агросистеми (ліси, поля, луки, парки), які є генераторами кисню як основи життя суспільства і тваринного світу.

Визначимо типи компонент виробництв, які є забруднювачами екологічного середовища згідно із стандартом України та ISO [8]:

1. Хімічні забруднювачі, які є згенеровані у процесі горіння палива в котлах (гази, дим, пил, тверді відходи) – $\{SO_2, NO_2, CO, Pt, NO, CO_2\}$;
2. Активні іони як продукти хімічних технологій $\{SO_2^-, Cl^-, NH_4^+, NO_3^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+\}$ у виробничих процесах з вироблення мийних засобів, перероблення нафти, металургії та інших виробництв;
3. Пилоподібні неорганічні компоненти відходів і газоподібні неорганічні речовини $\{SO_2, H_2S, NO_2, Cl_2, SiF_4, N_2\}$ у будівельній та комунальній галузі;
4. Мінеральні кислоти, утворені під час технологічних процесів $\{HCl, HF, H_2SO_4, HNO_3\}$ хімічних виробництв, будівельних галузях;
5. Фундаментальні компоненти для процесів фотосинтезу $\{O_2, H_2O, CO, CO_2\} \otimes \tilde{Z}(\lambda, n, \vec{H}_l, R_{sl})$ як відходи агросектору і ТЕС;
6. Пилоподібні продукти відходів будівельної промисловості (виробництво будівельних матеріалів різного рівня дисперсності $\{0,001-1,0\}$ мм, які є забруднювачами повітря, ґрунтів, водосховищ.

Сучасна концепція захисту екологічного середовища (атмосфери, водосховищ і річок, полів і лісів) ґрунтується на мінімізації викидів CO , CO_2 промисловості, теплової енергетики, автомобільного транспорту. Відповідно до цієї концепції розроблено комплекси приладів, аналітичних методів аналізу та оброблення даних для хімічного аналізу компонент забруднення середовища.

Якщо для хімічного аналізу компонент викидів промисловості в екосередовище впродовж XIX ст. розроблено комплекс методів [35, 42, 49, 51], приладів і систем [5, 6, 7, 12, 18, 20, 24, 32, 54, 55], то для концентрації пилу [54] існує проблема контролю.

Відповідно лазерні методи [37, 41, 42, 43] контролю пилового забруднення та концентрації (пилової суміші високотемпературних продуктів згорання вугілля і подібних компонент породи) забезпечують вирішення проблеми. Базові концепції теорії сенсорів [13] фізико-хімічної взаємодії не забезпечують повноти контролю екологічного стану за рівнем пилового забруднення [5, 21, 39, 12, 54].

Випадання пилу від транспорту, ТЕС, будівельної промисловості на просторово розподілену екологічну систему зелених насаджень (парки, ліси, поля, луки) впливає на фотосинтез і відновлення концентрації з

продукованого кисню (O_2), що призводить до погіршення якості атмосферного повітря, основи життєдіяльності

ті суспільства і тварин, птахів, агрокомплексу у їх взаємозв'язку.

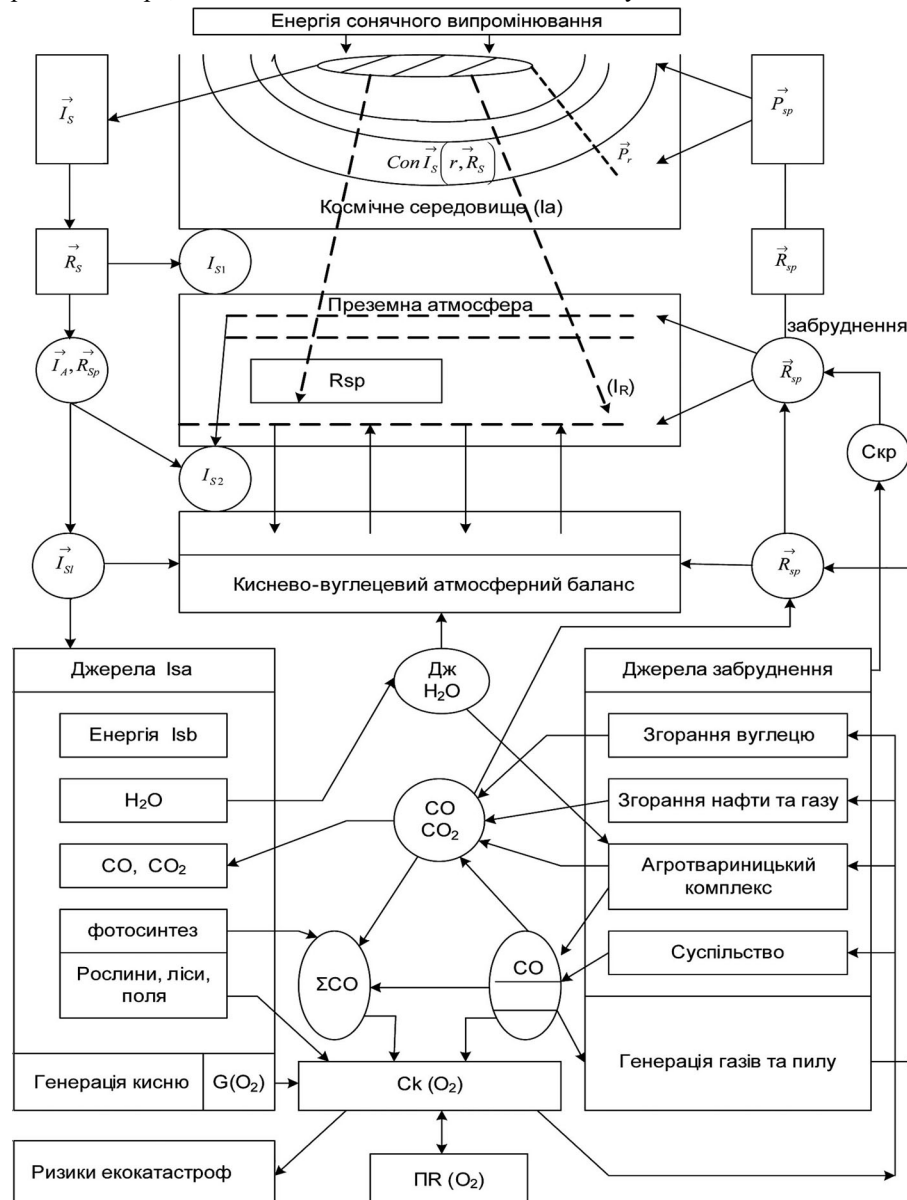


Рис. 1. Концептуальна схема системи киснево-вуглецевого балансу за нагромадження пилового техногенного забруднення екологічного середовища I_{sa} / Conceptual scheme of the carbon-oxygen balance system during the growth (accumulation) of dusty man-made pollution of the ecological environment I_{sa}

Системна концепція киснево-вуглецевого балансу в атмосфері глобальної екологічної структури. Врахування дії пилового забруднення на рівень інтенсивності фотосинтезу в листях зелених насаджень, полів агровиробництва, підтверджує важливість контролю рівня концентрації пилу в аеродинамічних забрудненнях повітряних потоків та потребу розроблення сенсорів для нових систем екологічного моніторингу на підставі інформаційних і лазерних технологій (рис. 1).

На рис. 1 введено такі позначення: $\vec{I}_s(n, \vec{\lambda}_{i, n-1})$ – потік фотонів у сонячному випромінюванні відносно Землі; $Con \vec{I}_s(r, \vec{R}_s)$ – конус напрямлених векторів інтенсивності фотонного потоку; $\vec{R}_s(\lambda_i)$ – вектор комплексного рівня розсіяння потоку фотонів від сонця; $(I_{A_i}, \vec{\Delta}_i, \vec{R}_{sp})$ – розсіяння фотонів у приземній атмосфері; $G(O_2)$ – генерація кисню в процесі фотосинтезу в листях дерев і рослин; Дж(H_2O) – світовий ресурс води морів, океанів, рік, водоймищ; $\vec{R}_{sp}$ – вектор розсіяння пилового потоку

від техногенного виробництва; C_{kp} – концентрація пилового забруднення атмосфери за розшарування структури екологічного середовища; $R_i(O_2)$ – локальний ресурс кисню в екосистемі середовища; $\vec{P}_{sp}, \vec{R}_{sp}$ – розсіяння пилових потоків в атмосфері земної поверхні; $MR(O_2)$ – світовий ресурс кисню, нагромадженого в атмосфері Землі.

Відповідно до проблемного завдання моніторингу концентрації пилу, згідно з розробленою концепцією киснево-вуглецевого балансу, побудовано концептуальну схему взаємодії потоків компонент у процесі фотосинтезу і відновлення балансу кисню в атмосфері внаслідок фізико-хімічних перетворень та енергетичних фотонних потоків сонячного випромінювання.

Базова концепція киснево-вуглецевого балансу ґрунтується на таких положеннях щодо еволюції глобальної екосистеми внаслідок зростання різних забруднювачів атмосфери [2]:

1. На історичному відтинку існування Землі нагромаджено певний ресурс (O_2).

- Джерелами генерації кисню у глобальну систему є комплексна структура біоценозу, в якій відбувається фотосинтез, продуктом якого є (O_2) після перетворення (CO) під впливом енергії сонця.
- Споживачем кисню на першому етапі існування глобальної структури Землі були людський ресурс і тваринний світ, на другому – виробництво, транспорт.
- Розвиток теплової енергетики, використання переробленої нафти і газу, будівництва та авіації та транспорту, призвів до різкого забруднення атмосфери, екосистеми, морів і океанів пилом, хімічними відходами, продуктами згорання вугільного та інших видів палива та відходами технологічних виробництв і комунального сектору міст і сіл.

Збільшення впливу факторів загроз за останні 50 років призвело до формування глобальної екологічної проблеми (див. рис. 1) щодо забруднення землі та атмосфери у світовому масштабі шкідливими викидами промисловості, енергетики, агроструктур та суспільного життя. На цьому рисунку наведено схему киснево-вуглецевого балансу за нагромадження пилового техногенного забруднення від продуктів згорання палива в транспорті, енергетиці, будівництві та інших галузях техногенної інфраструктури.

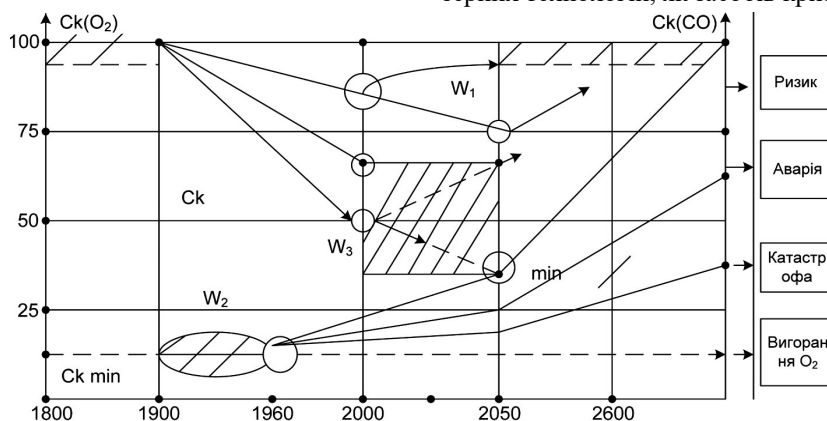


Рис. 2. Схема вікової траєкторії можливої зміни балансу / Scheme of the age trajectory of a possible change in balance $< O_2 \rightarrow (CO_2, CO_2) >$

Лазерне зондування енергоактивних технологічних процесів для отримання даних про концентрацію продуктів згорання палива та шкідливих промислових викидів пилу в навколишнє середовище. Для отримання даних про геометричні та фізико-хімічні параметри стану енергоактивного об'єкта (рівень рідини, концентрація речовин, хімічний склад, розміри, зміщення) в умовах, коли неможливо застосувати засоби прямого вимірювання, використовуються методи активного зондування у поєднанні з фізико-хімічним аналізом, а також оптичними та спектральними методами. Важливою проблемою є процеси та процедури відбору проб для динамічного термінального аналізу фізико-хімічного складу шкідливих і технологічних речовин, що утворюються під час виробничих процесів (технологічні рідини, забруднена вода з шкідливими домішками, продукти згорання вугілля, автомобільного та авіаційного транспорту, залізничних локомотивів, а також у нафтогазовій промисловості й енергетиці).

Схеми прямого лазерного зондування. Розглянемо схеми прямого лазерного зондування проб води, технологічних рідин, які залиті у фотометричні кювети ($N_p/1,2,3$), та потоків забрудненого повітря через оптичні затвори, які включені в технологічні пілепроводи (N_n). Для контролю забрудненого пилом екосередовища

Відповідно до концептуальної діаграми киснево-вуглецевого балансу запропоновано схему (рис. 2) вікової траєкторії можливих змін балансу $R(O_2) \rightarrow R(CO, CO_2)$ концентрацій.

Відповідно виділено термінальні цикли можливих змін концентрацій $C_k(O_2)$ та $C_k^2(CO, CO_2)$ для локальних регіонів світового атмосферного й екологічного середовища. Визначено кризові області для рівня концентрації $W_2(C_k^2)$, $W_3(C_k^1)$, $W_1(C_k^1)$, які визначають координати можливих криз та ремісій.

Відповідно до запропонованої концепції киснево-вуглецевого балансу на підставі результатів досліджень за минулі століття, особливо з 1900 по 2020 рр. можна ґрунтовніше оцінити ризики глобальних катастроф, якщо врахувати пилові забруднення на процес фотосинтезу.

Наведена концептуальна схема дає можливість врахувати вплив пилового забруднення на процес фотосинтезу $\{O_2\}$ та формування процесу роздвоєння атмосфери завдяки компонентам $\{CO, CO_2, H_2S, NO_2, SO_2, \dots\}$, ($n \in 1 \div 6$). Відповідно запропонована концепція підтверджує важливість розроблення системи моніторингу пилового забруднення на підставі нових інформаційно-лазерних технологій, як засобів кризового контролю.

обґрунтовано метод лазерного зондування середовища для оцінювання концентрації пилу.

Відповідно до методу відбору проб забруднювальних компонент у ході технологічного процесу розроблено схеми відбору проб для контролю та аналізу хімічного складу забруднювальних речовин і для вимірювання їх концентрації.

Відповідно маємо такі схеми процесу (рис. 3) зондування відібраних проб технологічних рідин і потоків відбору продуктів згорання, які розробили автори та слугують основою для створення лазерних систем екомоніторингу і технологічних процесів високої енергії [2]:

- П(1,2,3) – схема лазерного зондування водних і повітряних сумішей через кювети з відібраними пробами;
- П(4,5,6) – лазерне зондування середовища технологічної системи в робочому режимі через оптичні вікна;
- П(7) – концептуальна схема процесу лазерного зондування пилового забруднення середовища.

На рис. 3 введено такі позначення: $P_L(\vec{n}, \cos(\alpha_r))$ – потужність лазерного променя з напрямленим вектором $\vec{n}$ і конусом розсіювання ($\cos \alpha_r$) фотонного потоку за проходження середовища через вікна OB_1, OB_2 ; $R_S(\lambda, \vec{\theta})$ – оператор розсіювання лазерного променя (фотонів) з довжиною хвилі λ і параметром $\vec{\theta}$, який характеризує

параметри фонованого середовища; $P_S(C_K(T^\circ, \lambda, \theta))$ – сигнал лазера потужністю P_S на виході об'єкта зондування з довжиною хвилі λ і параметром $\bar{\theta}$; $(C_K, T^\circ C)$ –

параметри фізико-хімічного забруднення об'єкта зондування; (Z_C, Z_S) – моделі сигналів у процесі зондування об'єкта дослідження.

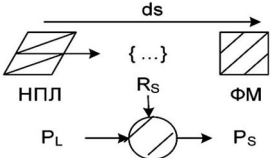
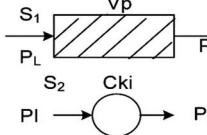
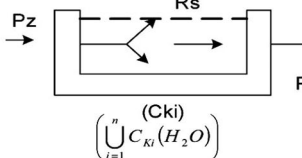
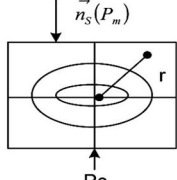
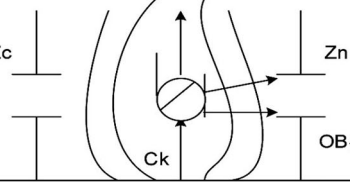
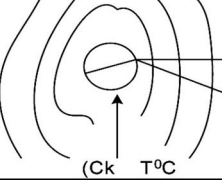
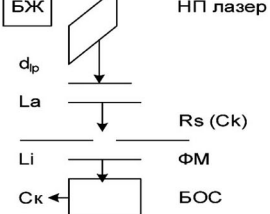
N пп	Модель зондування	Пробовідбір {Ck}	Модель {Cki}
1	Пряме лазерне зондування техногенного середовища		$C_k(dS, I_s)$
2	Зондування {Cki} повітряних сумішей в технологічних потоках з перерізом {Si}		$C_k(Sr, Rs)$ $C_k(Sl, Rs)$
3	Зондування забрудненої {Cki} водної суміші в прозорій кюветі.		$C_{ki} \dots \vec{P}_Z \rightarrow \vec{P}_S$ $(\bigcup_{i=1}^n C_{ki}(H_2O))$
4	Контроль турбулентних пилових потоків в технологічних системах і атмосфері		$C_K(P_m)$ $C'_R(\vec{n}, r, \alpha)$
5	Контроль турбулентних потоків в факелі згорання вугільного пилу в котлі енергоблока		$Z_C(\vec{n})$ $\frac{R_S(L, d)}{Z_S(C_K)}$
6	Контроль факела згорання вугільного пилу по інтенсивності світимості полум'я		$Z_S(I_S, C_K)$
7	Структурна система лазерного зондування пилового забруднення середовища		$C_K = F_Z \left(\frac{P_Z}{P_S} \right)$

Рис. 3. Методи лазерного зондування та відбору проб під час моніторингу екосистеми інфраструктури / Laser Sensing and Sampling Methods for Infrastructure Ecosystem Monitoring

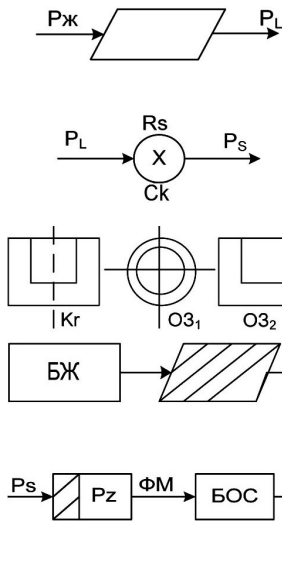
Схеми процесу зондування енергоактивних об'єктів зі складною структурою є підставою побудови схем вимірювальних перетворень фізичних параметрів функціонування системних компонент технологічних блоків у нормовані електричні з використанням різних типів сенсорів. Відповідно до завдання розроблено діаграму процесу зондування та функціональні схеми блоків оброблення сигналів для оцінювання рівня концентрації шкідливих компонент.

Відповідно до мети дослідження було розроблено метод лазерного зондування та відбору проб як основного способу оцінювання концентрації компонент забруднення екосередовища у процесі моніторингу середовища.

Позначення на пунктах (1-7) на рис. 3, який розробили автори [2]:

- $C_k(d_S I_S)$ – концентрація забруднювача середовища параметрами $(d_S I_S)$;
- $\{S_i\}$ – функція оцінювання забруднення середовища в об'ємі проби V_{Pi} , як спосіб просторового опису формування пилового забруднення;
- $\{\vec{R}_{Si}\}$ – вектор просторового розсіювання лазерного зондувального променя за проходження через контрольне середовище;
- $\vec{n}_S(P_m, t, \vec{z})$ – напрямлений вектор турбулентного потоку технологічних викидів, який формується у процесі виробництва;

- $\bar{Z}_C(t, \tau), \bar{Z}_S(t, \tau, R_S, C_K)$ – моделі зондувального і розсіяного лазерного сигналу;



лазер напівпровідниковий потужністю P_L з енергією живлення $P_{Ж}$, як генератор потоку фотонів зондування; розсіяння лазерного променя потужністю P_S на клітинні проби з концентрацією забруднювача C_K , просторовим функціоналом R_S ; геометрична структура пробної оптичної кювети для рідин K_r та $\{O3n\}$ – оптичні затвори; лазер потужністю P_L – потоку фотонів з блоком живлення БЖ, потужністю P_L ; схема приймання лазерного сигналу фотоматриці для приймання лазерного сигналу з блоком оброблення сигналу для визначення рівня концентрації пилу.

Інформаційна структура процесу лазерного зондування. У загальному вигляді інформаційну та просторово розподілену енергетичну взаємодію лазерного променя із середовищем можна представити через оператор розсіяння фотонного потоку на підставі діаграми перетворення, яку розробили автори [2]:

$$\left\langle \left\langle P_z(n, \bar{C}o\alpha) \frac{R_S(\lambda, \bar{\theta})}{C_K T^0 C} P_S(C_K(T^0, \lambda, \bar{\theta})) \right\rangle \right\rangle, \quad (1)$$

$$\left\langle P_S(C_K(T^0, \lambda, \bar{\theta})) \xrightarrow{R_S} P_S \right\rangle$$

$$\left\langle Z_C(n, \bar{P}_L) \frac{R_S(L, r, d, C_K)}{T^0 C} Z_S(C_K, T^0, C) \right\rangle$$

де: $P_Z(\cdot)$ – потужність лазера; $P_S(\cdot)$ – потужність розсіяного лазерного променя; C_K – концентрація домішок; $T^0 C$ – температура; $R_S(\cdot)$ – оператор розсіяння; Z_C, Z_S – модель лазерного скла.

Для лазерного контролю рівня концентрації шкідливих компонент технологічного виробництва використовуємо відкрите зондування середовища (N_S) з просторовим базисом установки лазера і фотоприймача (L_a, L_i), який для лазерів з потужністю випромінювання 50 мВт може досягти віддалі (1-100) м, технологічна віддаль для контролю забруднення навколишньої атмосфери пиловими відходами може досягти від 10 до 100 м за відповідної просторової установки лазерного фотометра.

Розглянемо інформаційну структурну діаграму перетворення лазерного сигналу, який є переносником відомостей, на підставі відбору даних про динамічний стан об'єкта та його технологічного середовища.

Відбір даних відбувається за просторово-часовою енергетичною взаємодією лазерного сигналу з об'єктом зондування [21]:

$$Z_S(B_F, t, P_S(\theta)) = Z_C(B_L, t, P_L) \otimes M_{SL}((B_{OT}, t, \theta), \bar{n}_S, \alpha_S), \quad (2)$$

де: $Z_C(\cdot)$ – сигнал зондування; B_L – базис геометричний; P_L – потужність лазера; M_{SL} – модельне зображення зони локації об'єкта по параметру стану; θ – параметр стану; $(B_{OT}, \bar{n}_S)$ – базис і орієнтація зони локації; α_S – коефіцієнт енергетичної взаємодії; $Z_S(B_F, t, P_S(\theta, \alpha_S, \bar{n}_S))$ – відбитий сигнал із середовища контролю; $(\cdot)$ – операція взаємодії; R_S – оператор розсіяного променя.

Відповідно до методу моніторингу наведемо концептуальну схему процесу зондування поля концентрації пилового забруднення техногенного середовища від викидів пилу та продуктів згорання палива різного типу в котлах теплових блоків комунальних структур і котлах енергоблоків, а також мікродисперсного пилу від інших виробництв. Наведемо схему зондування пилоподібного середовища (рис. 4).

Позначення на рис. 4: $T(f)$ – тактовий імпульсний генератор модуляції лазера; $\alpha_S, R_S(C_K), \theta$ – комплекс параметрів контрольованого середовища або проб води, рідин у каліброваних скляних кюветах; ΦM – фотоматриця (фотодетектор $2x$ або $4x$ сциїний; $ПЗС$ – матриця для цифрового оброблення образу променя лазера; $U_S(t, TC_K)$ – напруга сигналу перетвореного лазерного променя після проходження проби на виході матриці; $БОЛС$ – блок оброблення лазерного сигналу; $BHL(C_K)$ – блок нормування лазерного сигналу та масштабування шкали концентрації домішок; AI_{CK}, gI_{CK} – індикація параметра концентрації домішок в аналоговій і цифровій формах; PL – потужність лазера; $Bl(x, y, z)$ – опорний базис лазера; $Bl\Phi M$ – опора фотоматриці; Msl – касета для проби; P_S – потужність розсіяного лазерного променя; Pr – потужність імпульсного сигналу живлення лазера; Mij – форма імпульсу.

В основу методу, поданого на рис. 4, закладено імпульсну модуляцію, що забезпечує підвищення якості вимірювання та захисту від засвічування сторонніми променями і селекцію імпульсів струму на виході фотоматриці резонансними контуром, налаштованим на частоту f_r . Це забезпечує ефективне виділення лазерного сигналу після оброблення фотоматрицею за рахунок резонансного ефекту, підсилення та детектування. Після оброблення сигнал надходить на нелінійний компаратор зі шкалою перетворення: значення напруги і рівень концентрації згідно з функцією становить:

$$f(U(C_K)) \rightarrow K|U(C_K)| \rightarrow \hat{C}_K; U_S \rightarrow NH_{sh} \rightarrow U(C_K) \rightarrow |\bar{c}_K|. \quad (3)$$

Відповідно до завдання вимірювання концентрації забруднення для різних середовищ (повітря, вода, технологічні рідини, вугільний пил, технологічний пил та інші види викидів шкідливих речовин в продуктах горіння) використовуємо такі методи [39]:

- вибирають базову структуру лазерного концентратоміра та метод його комплексного використання з іншими вимірювальними системами для оцінювання концентрації пилу в повітрі і воді;
- фізико-хімічні сенсори, які використовують оптогальванічні сенсори, чутливі до певних хімічних сполук, потенціал яких на виході залежить від рівня концентрації речовин у воді або повітрі;
- фізико-хімічні сенсори для оцінювання шкідливих компонент в повітрі, селективні до певних сполук (газоаналізаторів "ОКСИ 5М") відповідно – $\{SO_2, NO_2, CO, NO, NO_2, CO_2\}$ та їх концентрації та аналізатори Simens.

Відповідно кожний клас сенсорів використовують для різних типів концентратомірів забруднення води, повітря, визначення хімічних компонент продуктів згорання, технологічних процесів, викидів в атмосферу динових газів теплових електростанцій, контролю концентрації вугільного пилу для котлів енергоблоків, пилового забруднення атмосфери.

Для кожного типу контролю розроблено методи відбору проб [37]:

- примусове втягування повітря та газів з відповідними параметрами $\{C_K, T^0 C, W_m\}$;
- відбір технологічної проби води в каліброваних скляних кюветах для оптичних і лазерних методів;
- зондування технічного процесу і середовища в робочому режимі.

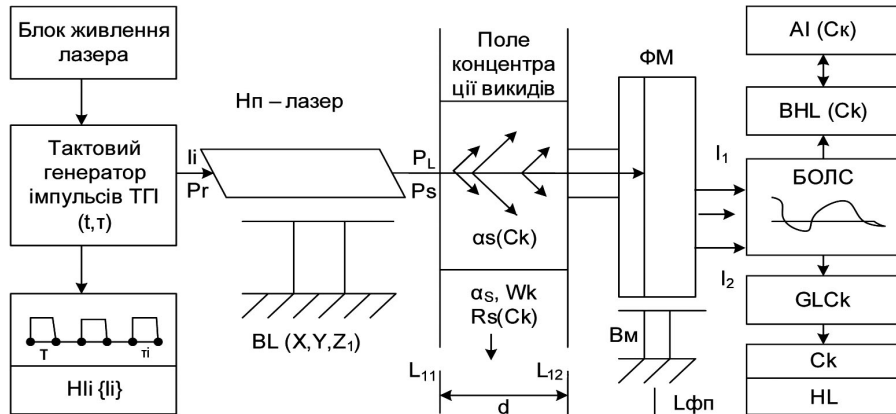


Рис. 4. Концептуально-структурна схема процесу зондування динамічних потоків викидів поля концентрації пилової суміші в базисі $((L_{01}, L_{02}) \cdot H$ об'єму Q_K / Conceptual and structural scheme of the process of probing dynamic emission fluxes of the dust mixture concentration field in the basis $((L_{01}, L_{02}) \cdot H$ of volume Q_K

Аналіз процесу лазерного зондування забруднення екосередовища газовими і пиловими шкідливими викидами від техногенних систем під час технологічного виробництва. Для оцінювання рівня концентрації шкідливих викидів просторово-енергетичну структуру лазерних сигналів вибирають з урахуванням геометричних перетворень опосередкованих потоків фотонів, щоб виконувалися умови активного зондування як у виділеному об'ємі так і в оптичних кюветах контрольованого середовища об'єкта:

$$\bar{Z}_C(B_F|\alpha_C) = \bar{Z}_C(B_L|P) \otimes \bar{n}_S, \quad (< \alpha_S = < \alpha_C), \quad (4)$$

де: $\bar{n}_S \in \mathbb{R}^3$ – векторна компонента, яка визначає проєкційні перетворення лазерного променя з діаметром d_L ; α_S – коефіцієнт розсіювання фотонів в об'ємі.

Тобто, відповідно до структури лазерного променя та типу методу контролю, формується лазерний зондувальний сигнал потужністю P_C у відповідному базисі установки лазера в стенді щодо кювети (PL/mBm) [21]:

$$\forall Z_X^C \in V_X(d_L \neq 0), P_{BL}^r Z_X^C \left(\frac{\bar{n}_S}{\alpha_S} \right) \frac{V_F(B_F)}{S_F} \gg S_{\Pi L}, \quad (5)$$

де: Z_X^C – просторова компонента зондувального променя; $V_X(d_L \neq 0)$ – поверхня перерізу променя (4); $P_{BL}^r Z_X^C$ – проєкція кожної точки променя, через взаємодію з зоною локації з опосередкованим вектором $\bar{n}_S$; на фотоприймач площею матриці; $S_F(< \alpha_S, < \alpha_C)$ – кути зондувального і відбитого променів.

Для енергетичної структури променя, який в процесі взаємодії вміщує дані про параметри θ технологічного середовища, маємо співвідношення (просторово-енергетична нелінійна модуляція):

$$I_S(\alpha_l(\theta) \cdot l)_{BF} = I_{0bc}(\theta | < \alpha_C) \cdot \alpha_l(\theta | < \alpha_S, l), \quad (6)$$

де: $I_0(\cdot)$ – інтенсивність зондувального сигналу; $\alpha_l(\cdot)$ – коефіцієнт розсіювання лазерного променя, який відображає взаємодію променів з середовищем TO -об'єкта, що характеризується параметром θ .

Згідно із законом Бугера потужність відбитого лазерного променя за зондування середовища буде $P_S(\theta) = P_{OL} e(-\alpha_T(\theta)l)$ за P_{OL} – потужність оптичного ла-

Відповідно до класу завдання контролю процесу зондування динамічних потоків викидів використовують стаціонарні та переносні лазерні концентратоміри для оцінювання концентрації тонкодисперсного пилу в повітрі та продуктах згорання палива різних видів.

ра, де: $\alpha_T(\theta)$ – коефіцієнт розсіювання в зоні локації з траєкторією взаємодії l лазерного променя й технологічного об'єкта; P_S – потужність отриманого сигналу.

Вимірювальна інформація одержується на підставі енергосторового перетворення лазерного сигналу, який проходить через середовище проби і втрачає потужність за рахунок розсіювання фотонів в об'ємі речовини [37, 38]:

$$[\alpha_T(\theta)l] = [\ln P_{OL} - \ln P_S^*]; \quad P_S^* = P_S + \sum_{i=1}^n P_{Si}. \quad (7)$$

Відповідно до моделі зондування середовища оцінювання параметра лазерного променя на виході кювети пов'язане з інтервалом значень коефіцієнта розсіювання в середовищі. Потужність зондувального сигналу на виході кювети з пробою. Після проходження контрольованого об'єму згідно з даними [37, 38] алгоритм визначається в блоці оброблення сигналу оцінювання рівня концентрації, а саме:

$$\hat{\theta}|_{SL} = \phi(\alpha_T(\hat{\theta})l)|_{SL} = \hat{\theta}_e(\hat{P}_S|P_{OL} = const_{SL}) = K_Z \cdot P_S^*|_{SL}, \quad (8)$$

де: SL – логарифмічна шкала; $\hat{\theta}_e|_{SL}$ – оцінка параметра стану технологічного об'єкта; K_Z – коефіцієнт зондувального перетворення; P_S – підсвічування від зовнішніх джерел; P_{OL} – потужність лазерного сигналу; P_S^* – розсіяний (відбитий) лазерний сигнал – переносник параметра θ .

Залежно від прийнятого методу лазерного контролю об'єкта, розроблено схему активного зондування параметра стану середовища технологічного об'єкта (див. рис. 2). Така структура може реалізувати два режими активного зондування з модуляцією імпульсного лазера і в неперервному режимі генерації фотонного потоку з енергією $\{P_{Li}\}$.

Відповідно розроблено дві моделі зондування [37]:

- 1) пряме зондування технологічного середовища – тобто проходження потоку фотонів через певний об'єм, в якому розсіюються з коефіцієнтом $R_S(C_K)$ і який залежить від концентрації технологічних компонент, як у повітрі, так і у воді (рідині);
- 2) опосередковане комплексне оцінювання параметрів технологічного середовища за лазерного зондування

під кутом α_s та відбору розсіяного фотонного потоку, який формує інформаційний сигнал $Z_S(\alpha_r, C_K)$ про стан об'єкта.

Для підвищення ефективності і коректності вимірювання рівня концентрації шкідливих речовин використовуються нові методи оброблення лазерного сигналу за його модуляції імпульсами струму зі заданою частотою. Відповідно до завдання розроблення методу вимірювання рівня концентрації середовища з техногенним забрудненням, розроблена структурна схема концентратоміра з використанням моделі вимірювання по розсіяному лазерному промені:

$$Z_C \xrightarrow{P_L} (\bar{R}_S(C_K, \alpha_r)) \rightarrow \bar{Z}_S(\alpha_r, C_K) \rightarrow A_S^n(C_K) \rightarrow \hat{C}_K, \text{ мг/м}^3, \quad (9)$$

де $A_S^n(C_K)$ – нелінійний оператор формування сигналу рівня концентрації згідно зі шкалою нормування параметра (рис. 5).

Різні режими лазера забезпечують відповідно способи формування променя [37]:

- з модуляцією для підвищення чутливості й розширення шкали – SL ;
- без модуляції, що збільшує вплив зовнішніх підсвічувань P_S .

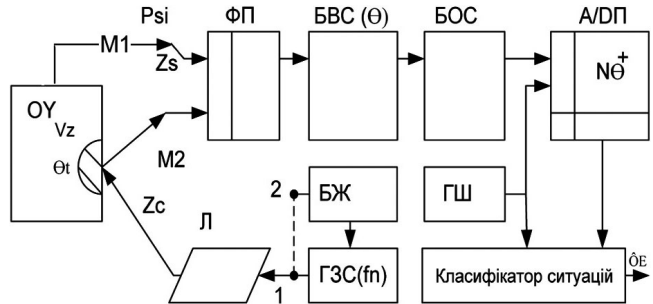


Рис. 5. Структурна схема концентратоміра з активним лазерним зондуванням параметра стану технологічного середовища в зоні контролю по вектору коефіцієнта розсіяння $\bar{Z}_S(r, t, \alpha_r(C_K))$ / Structural diagram of a concentrator with active laser probing of the parameter of the state of the technological medium in the control zone by the scattering coefficient vector $\bar{Z}_S(r, t, \alpha_r(C_K))$

За активного зондування параметра стану технологічного середовища використано позначення: ГЗС – генератор зондувального сигналу; Z_C – сигнал від лазера Л; Z_S – сигнал відбитий від зони активної взаємодії Z_S ; ФП – фотоприймач лазерного сигналу; БВС(θ) – блок виявлення сигналу про параметр стану θ ; БОС – блок опрацювання; ГШ – генератор шкали; А/ДП – аналоговий дискретний перетворювач сигналу в цифрову форму N_0^t – в момент часу t ; $\hat{\theta}_E$ – експертна оцінка ситуації за рівнем концентрації.

Оцінка рівня концентрації в області зондування технологічного процесу ґрунтується на інформаційних перетвореннях по (C_K, θ) (відповідно до типу методу зондування – пряме зондування M_1 – середовища або по відбитому промені M_2 , при інтенсивності лазерного сигналу, I_Z – зондуючого, I_S – розсіяного.

Відповідно побудовано категорно-функціональну діаграму перетворення зондувального сигналу в процесі моніторингу об'єкта техногенної інфраструктури (рис. 6).

Діаграми перетворення лазерного сигналу є методичною основою синтезу структури концентратоміра з використанням інформаційних технологій для опису

процесів у процедурі опосередкованого вимірювання концентрації забруднення атмосфери і техногенного середовища.

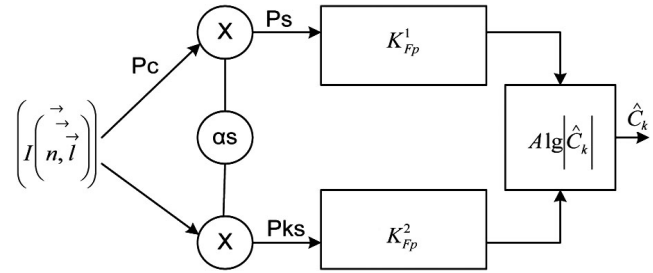


Рис. 6. Категорно-функціональна діаграма зондування / Categorical-functional sensing diagram

Діаграма перетворення лазерного сигналу в процесі моніторингу ґрунтується на інформаційно-енергетичній концепції [39]:

$$I(\bar{n}, l) \leftarrow Z_C(\omega_M, P_L), t; \\ C_K \rightarrow Z_S(\omega_M, P_S(C_K, \alpha_S), t) \rightarrow \\ \rightarrow U_{FP}(\omega_M, t, \theta_F(C_K)) \rightarrow \left| \frac{\hat{U}_{FP}}{\theta_F(C_K)} \right| \rightarrow \hat{C}_K, \left[\frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \right], \quad (10)$$

де: C_K – рівень концентрації компонент; Z_C, Z_S – зондувальний модуляційний сигнал лазера і відбитий; ω – частота модуляцій лазерного сигналу; $R_S(C_K)$ – коефіцієнт (функціонал) розсіяння лазерного сигналу в об'ємі зондування з концентрацією пилу $\{C_i\}$, $\{(K_{Fn}, K_{Fp})\}$ – оператори, які характеризують інформаційно-енергетичні перетворення лазерного сигналу після проходження фондованого середовища в блоку оброблення сигналу $(K_{Fp}: Z_S(C_K) \rightarrow U(C_K))$.

Аналіз режимів котла енергоблоків щодо рівня викидів забруднення в середовище (продукти згорання палива, пил, тверді компоненти). Відповідно до методу дослідження потоків пилу з динамікою зміни концентрації шкідливих компонент розглянемо конкретний технологічний експертний аналіз режимів енергоблоків ТЕС. Відповідно норми потужності енергоблоку забезпечують вимоги (рис. 7) нормального (робочого) режиму функціонування котла для генерації високотемпературної пари для руху турбіни $(T^0C, \bar{P}(t))$.

На рис. 7 введено такі позначення (опис можливих динамічних ситуацій): $Sit\ t_i$ – ситуаційні режими енергоблоку за різних навантажень; $\{W_i\}$ – інтервал зміни вмісту породи, що визначає якість функціонування котла енергоблоку; $\{Q_i\}$ – об'ємний вміст породи у вугіллі після помолу в млинах; $\{I_i\}$ – інтервал зміни концентрації породи після помолу в млинах; $\{P_{mi}\}$ – інтервал невизначеності рівня потужності за зміни якості вугілля; $\{P_{ri}\}$ – режимні межі генерування потужності енергоблоком; $\{T_r, T_K, T_n, T_j\}$ – інтервали часу пуску і виходу на критичний режим; $\{ConV_i(P)\}$ – конуси наборів потужності енергоблоку.

Розглянемо набір ситуацій режиму [39]:

- $Sit_1\{T_{mi}\}$ – ситуація виводу на максимальний режим енергоблоку за використання якісного вугілля, газу за термін $\{T_K\}$ і ризиком аварії;
- $Sit_2\{T_{mi}\}$ – ситуація за вмісту породи 10 %) виводу на робочий режим в інтервалі $\{W_1, W_2\}$, за якого можливе досягнення максимальної потужності, але зростає кількість твердих і газових продуктів згорання (шлаків);
- $Sit_3\{T_{mi}\}$ – ситуація за вмісту породи у вугільному концентраті від 10 до 40 %, виводу на заданий режим можлива в разі збільшення концентрації продукту помолу

млинами в об'ємі, що призводить до збільшення викидів шлаку, продуктів згорання (гази) і шкідливих викидів через димарі ТЕС в атмосферу;

• $Sit_4(T_r, T_k, T_n)$ – ситуація, яка склалася на інтервалах часу як пускового, так і робочого режиму роботи системи моніторингу (за $Q_n \geq 40\%$).

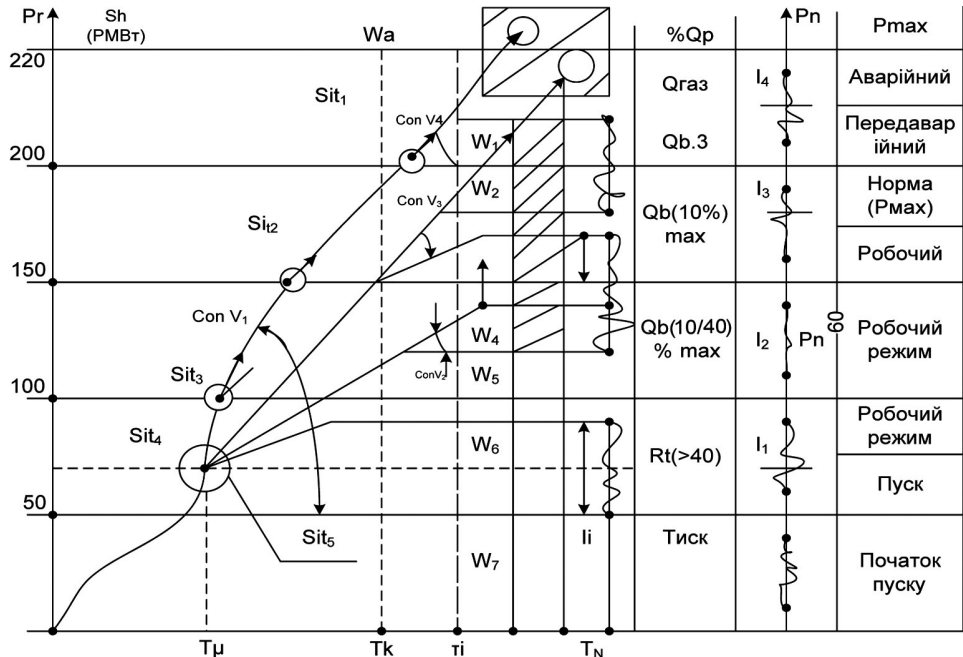


Рис. 7. Діаграма режимів потужності енергоблока за різного вмісту породи вугілля / Diagram of power modes of the power unit at different coal content

Відповідно до вмісту породи у вугільному паливі, визначимо області $\{W_i\}$ та інтервали критичної потужності та ліній наближення до аварійного режиму. Згідно з технологічними ситуаціями і нормами навантаження енергоблоку розглянемо набір ситуацій режиму в умовах кризового управління за низької якості вугілля.

Для контролю процесу горіння в котлі енергоблоку використовується спектральний (RgB – *спектр*) аналізатор Київської фірми Аналітик "Марс" та системи контролю "Simens" газової суміші продуктів згорання вугілля (CO , CO_2 , NO , SO_4) та надлишків $\{O_2\}$.

Концентрація пилу від розмолу породи оцінюється розрахунково на підставі оцінювання розбалансу використання неякісного вугілля і можливої максимальної потужності. Відповідно ця ситуація створює проблему контролю концентрації високотемпературного шкідливого впливу на режим пилу від породи. За високої концентрації (у вугільному пилу після помолу) породи, яка вміщує компоненти з внесенням сірки, може виникнути аварійна ситуація зупинки процесу горіння (зрив факела). У такому режимі роботи котла, у процесі горіння потоку вугільного пилу, формуються як газові струмені, так і тверді компоненти, що знижує температуру факела, тепловіддачу. Відповідно тверді частини випадають в нижню частину реактора, перекриваючи режимні зони відходами, що призводить до зміни конусів набору потужності котла.

Контроль концентрації вугільного пилу у пилепроводах на вході в реактор котла в робочому режимі енергоблоку, та газів на вході електрофільтрів. Контроль концентрації вугільного пилу після помолу в млині, подача в пилопроводи котлів енергоблоку є основою визначення рівня продуктів згорання залежно від режиму навантаження енергоблоку. Якість помолу (мікродисперсного) залежить від типу вугілля, поставленого з різних вугільних шахт. Вугілля різних джерел має вміст породи 10-40 %, з яких формуються викиди

пилу як забруднювачі атмосфери, при цьому високий рівень вмісту породи знижує енергетичну ефективність вугілля. Джерелом енергії є процеси горіння самого вугілля і відповідно формується потік шкідливих газів, які викидуються в атмосферу. Енергетичний рівень процесу горіння залежить від концентрації вугільного пилу, який відповідно забезпечує в процесі спалювання енергетичну потужність котла. За зміни якості вугілля при різних поставках, різке збільшення концентрації призводить до набору потужності і виходу режиму роботи котла енергоблоку в граничний або передаварійний стан, тобто до нестабільного стану.

Для експертного оцінювання ситуації необхідно виконати процедуру рангування потужності блоку за якісного палива.

Табл. 1. Рангування рівнів потужності енергоблоку за використання якісного вугілля / Ranking of power unit power levels when using high-quality coal

№ з/п	Концентрація	Rang відліку	Потужність
1	min 3,2 г/м ³	Rang 3, –	> 60 МВт
2	норма 6,8 г/м	Rang 2, –	80-100 МВт
3	норма 8,074 г/м ³	Rang 1, +	100-140 МВт
4	max[12,16,-29] г/м ³	Rang 4, + / Rang 8+	140-180 МВт

Для контролю концентрації вугільного пилу в пилепроводах котла використовувався лазерний концентратомір, розроблений у Центрі стратегічних досліджень "ЕБТЕС" (серія виводилася для Бурштинської ТЕС). Відлік рівня концентрації вугільного пилу виконувався за ранговим індикатором зі шкалою калібрування [$Rang\ 8^-$ – $Rang\ 8^+$] – яка перекривала по діапазону потужності [60-200] МВт

Ранговий індикатор забезпечує контроль робочого режиму та сигналізує вихід на граничний режим подачі палива за рахунок викиду пилу підвищеної концентрації.

Викид концентрації вугільної складової може призвести до великих об'ємів викидів пилу або аварійної си-

туації, вибуху котла. Тому необхідно проводити контроль концентрації вугільного пилу в пилопроводах котла та сигналізувати про можливість виникнення аварійних режимів. Результати контролю високотемпературних потоків вугільного пилу в пилопроводах котлів енергоблоку наведено у протоколах вимірювань (N_1 , N_2), які проводились з метою калібрування шкали концентратоміра, який розроблений на підставі методу дистан-

ційного зондування. Відбір проби для аналізу проводили на підставі гравітаційно-потокowego методу лінійками (з нагромаджувачем пилу) через оптичні затвори в трубі пилопроводу.

Динаміку зміни навантаження та її рангування за потужністю наведено на рис. 8, яка містить весь інтервал допустимої нормованої потужності рангової згідно з концентрацією вмісту породи в концентраті.

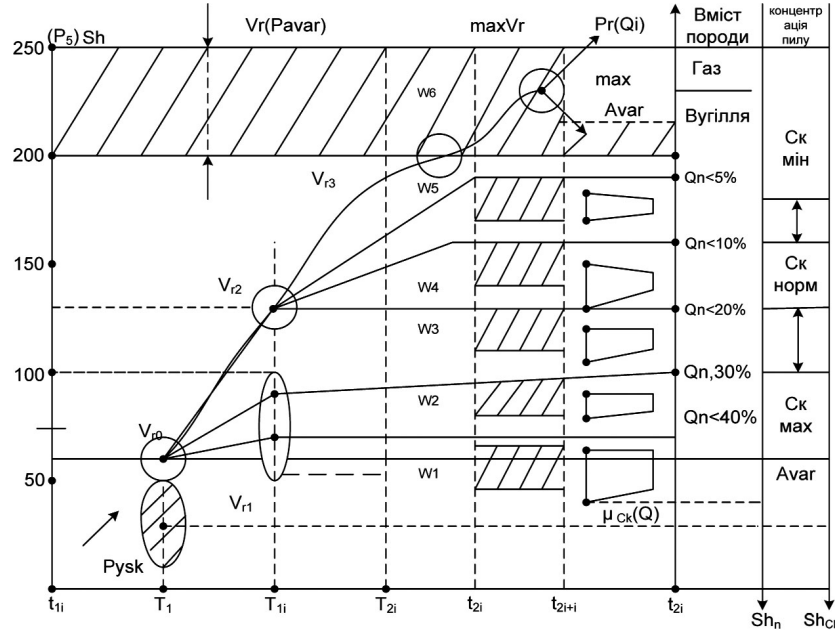


Рис. 8. Рангування динаміки навантаження енергоблоку з урахуванням вмісту породи у вугіллі після помолу в млинах / Analysis of the dynamics of the power unit load taking into account the rock content in the coal after grinding in mills

На рис. 8 введено такі позначення: $I(C_K)$ – інтервали значень концентрації; $\{Q_n\}$ – вміст пустої породи у вугільному концентраті; $V_r(Pabr)$ – аварійна область режиму; $\mu_{ck}(Q_p)$ – функція належності оцінювання вмісту породи; P_{EB} – потужність енергоблоків МВт.

Відповідно до вибраного методу лазерного зондування концентрації вугільного пилу після помолу в млинах (Ма, Мб), в пилопроводах за умов високих температур суміші (400-900) °С, і подачі в зону горіння котла енергоблоку визначено кризові пускові області режиму ($V_{r,i,0-1}$) його функціонування. Також було проаналізовано ранги пускових областей режиму виходу на нормативні параметри енергоблоку [39]:

- $V_{r0}(T_i)$ – підготовчі процедури пуску котла;
- $V_{r1}(T_{i1}), V_{r2}(T_{i1})$ – області режиму за якісного вугілля (V_{r2}) і вмістом породи (V_{r1});
- $\langle V_{r3}(T_{21}), W_6 \rangle$ – вихід в область граничного режиму (якісне вугілля, газ) за мінімальної генерації пилу від породи;
- $\langle V_{r4}, \max P_{EB}, \min Q_i \rangle$ – максимальна потужність енергоблоку за певних режимів його роботи.

Табл. 2. Таблиця аналітичних розрахунків / Table of analytical calculations

№ з/п	Блок №	Пилепровід вугільний	Швидкість потоку (м/с) і час $\tau_i = 10$ с	Оцінювання $\hat{C}_K$, г/м³	Дата і протоколи
1	4	А	10	3,2	№ 4, 21.09.21
2	4	Б	10	8,074	$T_{200} = 6/8$
3	4	А	10	6,8	№ 2, 21.09.21
4	№ 4	Б	10	12,16	$T_{200} = 6/8$

Відповідно результати аналітичних розрахунків лабораторних проб згідно з протоколами (№ 1, 2) проведення контрольних замірів на енергоблоці № 4, який

працював в режимі, заданому диспетчером системи, наведено в табл. 2.

Методи і засоби експериментальних досліджень на підставі технології лазерного зондування техногенних середовищ і стану екосистеми. Для проведення комплексних досліджень стану екологічного середовища техногенних систем, при забрудненні відходами виробництва – шкідливими компонентами в рідкому і газовому стані та пилом, використовували методи інформаційних технологій для опрацювання та інтерпретації даних, лазерно-інформаційне зондування середовища, теорію управління складними системами в галузях енергетики й інших.

Для виконання цього застосовували стандартні нормативні методи екологічного контролю з використанням як зарубіжних, так і вітчизняних апаратних засобів [2], зокрема:

- спектроаналізатори газів "Марс" та фірми "Simens" – для контролю газових продуктів згорання вугільного пилу;
- лазерний концентратомір вугільного пилу – розроблено з участю авторів у Центрі стратегічних досліджень еко-технічних систем, виготовлено на дослідному заводі ФМІ АН України, впроваджено на функціональних енергоблоках Бурштинської ТЕС.

У ході комплексних експериментів з лазерного зондування газових потоків, пилового забруднення атмосфери та рідинного середовища (в кюветах з пробою) виконано цифрове знімання образів лазерного треку та перерізу лазерного променя під час зондування та отримано такі зображення (рис. 9). Цифрові фотографії лазерного променя при проходженні через канал контролю середовища об'єкта отримано в процесі лабораторних досліджень.

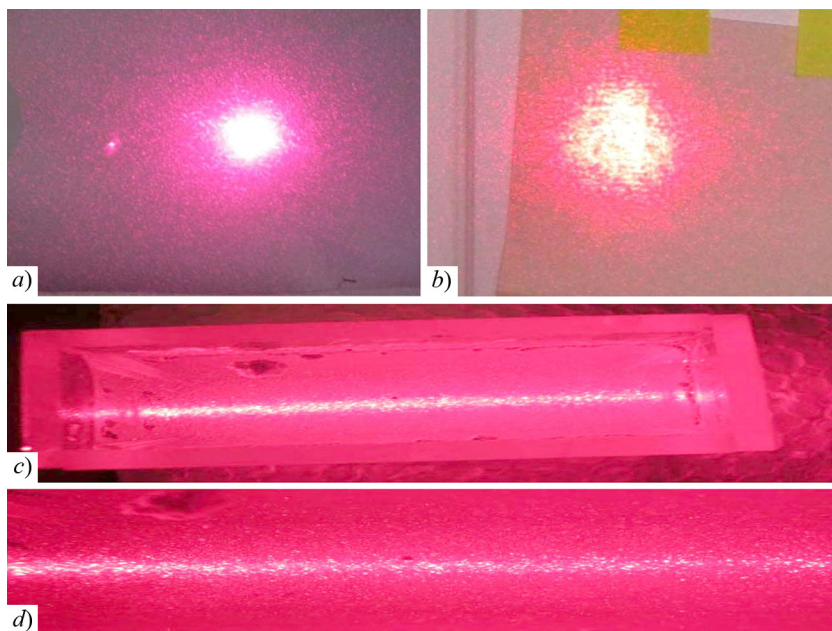


Рис. 9. Структура зондувального лазерного променя на виході каналу для різних типів технологічних середовищ / Structure of the Sounding Laser Beam at the Channel Output for Different Types of Process Media: *a)* середовище однорідне з низьким рівнем концентрації домішок / the environment is homogeneous with a low level of impurity concentration; *b)* середовище однорідне з високим рівнем концентрації домішок / homogeneous medium with a high concentration of impurities; *c)* поздовжній прохід лазерного променя через середовище (пилловий потік) з мінімальною забрудненістю / longitudinal passage of the laser beam through the medium (dust flow) with minimal contamination; *d)* поздовжній прохід лазерного променя через середовище (пилловий потік) з високим рівнем домішок / longitudinal passage of a laser beam through a medium (dust stream) with a high level of impurities

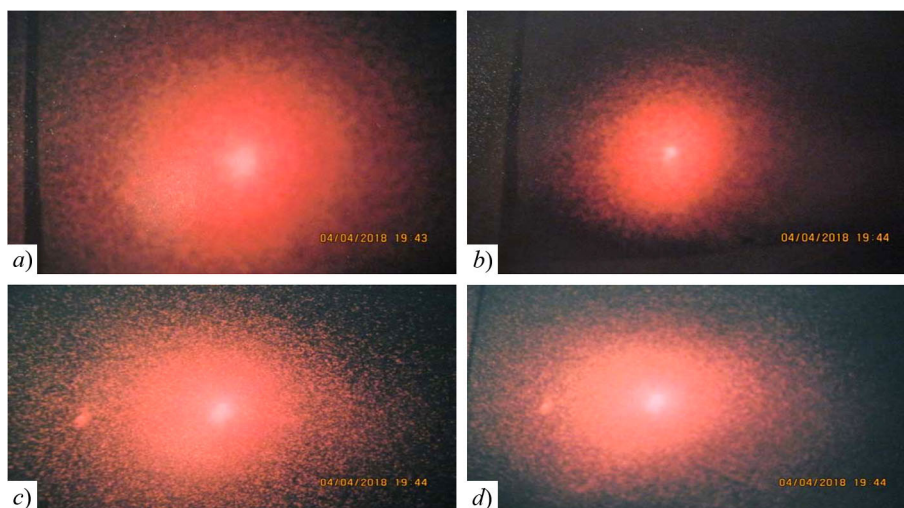


Рис. 10. Зондування екологічного середовища (атмосфери приземної) за високих рівнів пилового і димового забруднення / Probing of the ecological environment (surface atmosphere) at high levels of dust and smoke pollution: *a)* максимальне забруднення середовища / maximum environmental pollution; *b)* мінімальне забруднення середовища / minimal environmental pollution; *c)* чистіше середовище / cleaner environment; *d)* середнє забруднення середовища / medium environmental pollution

Під час зондування пилових експериментальних потоків у лабораторних умовах отримано цифрові фотографії перерізу променя з екрану з мікрозернистою структурою, які наведено на рис. 10.

Фотографії, зроблені цифровим апаратом перерізу лазерного променя, спроектованого на екран із сірого картону за різних концентрацій пилового забруднення повітря наведено на рис. 11.

Результати відображають стан екосередовища різних підприємств на підставі набору даних за період рік (2023). Під час проведення комплексного контролю стандартним методом дослідження впливу технологічних забруднень отримано дані з діючих підприємств (рис. 12).

Під час проведення контрольних екологічних вимірів рівня діючих промислових підприємств за 2023 р. отримано комплексні дані, які підтверджують тезис, що

сучасні прилади оперативного контролю (Оксі 5М) не забезпечують вимірювання концентрації пилу як базової компоненти впливу на процес фотосинтезу і регенерації кисню.

Для звіряння методів лазерного зондування пилових і газових викидів технологічних систем наведено дані, отримані за допомогою стандартної апаратури виробництва фірм України (Оксі 5М). На гістограмах (рис. 13) наведено результати екологічного моніторингу валових викидів шкідливих речовин різними підприємствами.

Отримані результати розсіяного лазерного променя через пилове середовище відображено на рис. 9-11, які проводилися лазерною інформаційно-вимірювальною системою. На рис. 12 і 13 наведено гістограми викидів і валових викидів шкідливих речовин в атмосферу, які проводилися газоаналізатором "ОКСІ М-5".

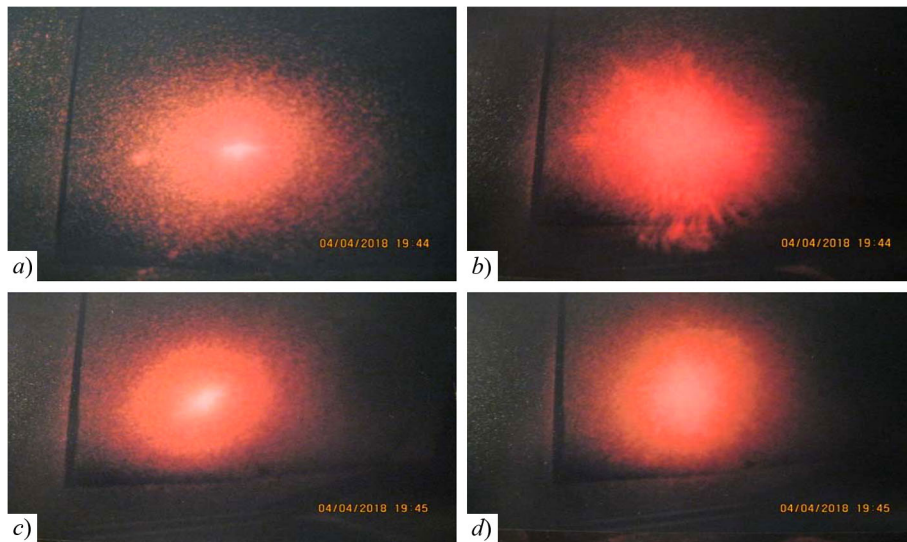


Рис. 11. Зондування пилового середовища з середнім рівнем пилового забруднення атмосфери ($C_K \leq 10 \text{ г/м}^3$) / Sensing of the dust environment with an average level of dust pollution of the atmosphere ($C_K \leq 10 \text{ g/m}^3$): a) середньо забруднене середовище / moderately polluted environment; b) дуже забруднене середовище / very polluted environment; c) менш забруднене середовище / less polluted environment; d) забруднене середовище / polluted environment

Обговорення результатів дослідження. У роботі [48] розглядають основні елементи управління в галузі охорони довкілля та аналізують наукові підходи до поняття та значення управління у сфері використання природних ресурсів і охорони навколишнього природного середовища. Також викладено методика визначення сукупності аналізу нормативних і теоретичних підходів щодо управлінської діяльності в галузі охорони довкілля з використанням методів логіко-семантичного, порівняльно-правового та методу правового аналізу.

У роботі [4] наведено оцінку мікроелементів у повітрі та їх вплив на рослинність з використанням методу атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно пов'язаною плазмою.

У посібнику [11] розглянуто питання розроблення та використання аналітичних приладів і систем, спрямованих на вирішення завдань екологічного моніторингу. Наведено інформацію про сучасні газоаналітичні комплекси та системи техногенно-екологічного контролю. Також подано основні відомості про електронні компоненти, які використовуються в електронних системах різного призначення, зокрема в аналітичному обладнанні.

У роботі [30] розглядають потенціал відкриття нових напрямів досліджень завдяки використанню бездротових сенсорних мереж, які забезпечують високу просторову та часову роздільну здатність. Це дає змогу дослідникам "спостерігати за тим, що раніше було недоступним", збираючи різноманітні дані – від температури до зображень і звукових сигналів – на великих територіях з високою частотою, навіть кілька разів на секунду. Такі можливості відкривають шлях до інтенсивного та масштабного збирання даних екологами і польовими біологами, а також до отримання нових типів інформації. Потіки даних у реальному часі дають можливість оперативно реагувати на події, значно розширюючи можливості досліджень у польових умовах.

У роботі [31] аналізують інноваційне застосування сучасних давачів і сенсорних мереж у галузі екологічних досліджень. Використання цих передових технологій відкриває нові можливості для спостереження за навколишнім середовищем, розширюючи просторові й часові масштаби досліджень. Це сприяє точнішому вив-

ченню прихованих або складних явищ і може стати основою для несподіваних відкриттів чи розвитку нових наукових підходів.

У роботі [39], на підставі проведених теоретичних досліджень та експериментальних робіт, розроблено та обґрунтовано концепцію забезпечення екобезпеки техногенного середовища і соціальних систем на підставі ідеї балансу ресурсів ($\text{Кисень (O}_2\text{)} \Rightarrow \text{вуглецеві сполуки } \{C_i, R_i\}$ та вплив на рівень взаємодії продуктів згорання (вугілля, дрова, агровідходи), життєдіяльності людини. Особливу увагу приділено механізмам оптимізації використання природних ресурсів і мінімізації негативного впливу на довкілля через зменшення обсягів викидів парникових газів, пилових часток, токсичних речовин та зольних залишків. Запропоновано інтегрований підхід до аналізу циклів споживання та відновлення ресурсів, який враховує енергетичну ефективність, екологічну стійкість, зменшення концентрації пилу в повітрі та соціально-економічний розвиток, розроблено компоненти апаратного забезпечення для комплексності лазерних систем.

У роботі [17] наведено підходи до послідовного вимірювання та моніторингу стану середовища існування за допомогою бортового лазерного сканування та безпілотних літальних апаратів. Автори стверджують, що індикатори стану середовища існування є важливими для відстеження прогресу збереження, але вимірювання біотичних, абіотичних і ландшафтних характеристик із високою роздільною здатністю на великих просторових просторах залишається складним завданням. У своєму дослідженні автори надали комплексний синтез проблем і рішень для послідовного вимірювання та моніторингу стану середовища існування за допомогою дистанційного зондування з використанням бортового виявлення світла та визначення дальності LiDAR (англ. *Light Detection and Ranging*) і доступних безпілотних літальних апаратів (БПЛА, англ. *Unmanned Aerial Vehicles* – UAVs) на багатьох ділянках і в транснаціональних або континентальних масштабах. Основні проблеми містять варіабельність характеристик давачів і планів опитувань, непрозорі робочі процеси попереднього оброблення, неоднорідні та складні дані, проблеми з на-

дійністю показників та індексів, обмежену можливість узагальнення моделі та її передачі між сайтами, а також труднощі з оброблення великих даних, таких як керування великими обсягами та використання паралельних або розподілених обчислень. Автори припускають, що спільне хмарне віртуальне дослідницьке середовище

VRE (англ. *Virtual Research Environment*) для дослідження та моніторингу стану середовища існування могло б надати рішення, враховуючи інструменти для виявлення даних, доступу до них і їх стандартизації, а також робочі процеси геопросторової обробки для бортових даних LiDAR і UAVs.

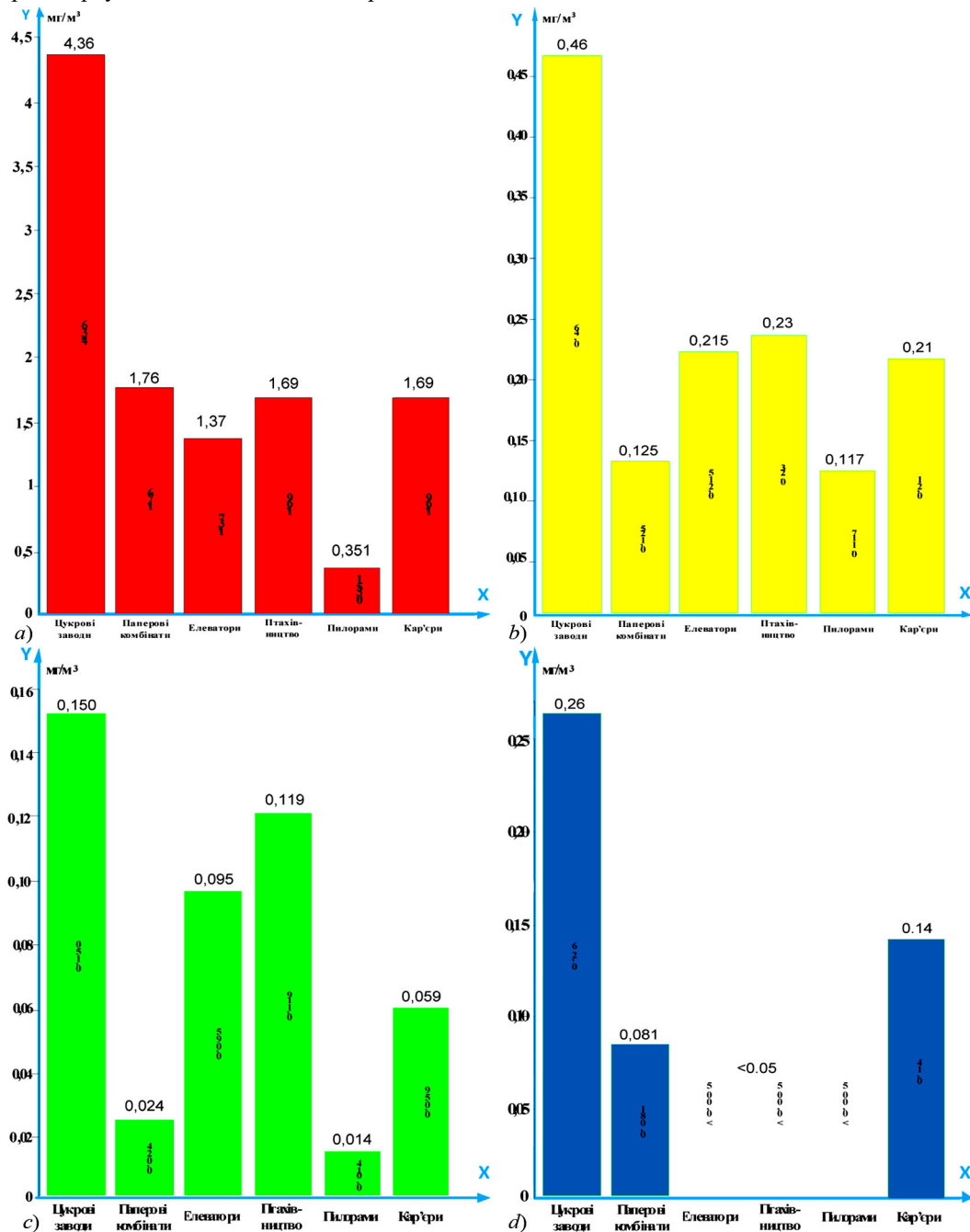


Рис. 12. Графіки викидів шкідливих речовин різними підприємствами за 2023 р. / Graphs of emissions of harmful substances by various enterprises for 2023

VRE також покращить управління даними, стандартизацію метаданих, відтворюваність робочого процесу та можливість передачі алгоритмів структурування з руху та моделей машинного навчання, таких як випадкові ліси та згорткові нейронні мережі. Разом із найкращими практиками для збору даних і впровадженням принципів FAIR (англ. *Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability* – можливість пошуку, доступності, сумісності), багаторазового використання і відкритих наукових практик, VRE може забезпечити більш послідовне та прозоре оброблення даних і пошук показників, наприклад, для середовища існування Natura 2020.

Зрештою, ці вдосконалення сприятимуть процесу розроблення більш надійних індикаторів стану середовища існування, допомагаючи запобігти деградації середовища існування та сприяючи сталому використанню природних ресурсів.

У роботі [2] розроблено та обґрунтовано нові підходи до формування концепції та парадигми екобезпеки, які базуються на системному підході до управління ресурсами, моніторингу екологічного стану довкілля та інтеграції інноваційних технологій. Концепція передбачає гармонізацію взаємодії техногенних і природних систем шляхом застосування енергоефективних техно-

логій, скорочення обсягів техногенного пилу та інших шкідливих викидів, а також впровадження сталих практик управління відходами.

Парадигма екобезпеки охоплює стратегічні напрями розвитку, які спрямовані на збереження екосистем, відновлення природного балансу та покращення якості життя людей [2, 39]. Вона містить принципи запобігання екологічним ризикам, адаптації до змін клімату та

впровадження циркулярної економіки, що дає змогу забезпечити сталий розвиток соціальних систем у контексті глобальних екологічних викликів.

Розроблені технології моніторингу викидів шкідливих речовин можуть бути впроваджені на промислових підприємствах, у системах державного екологічного контролю, а також у наукових дослідженнях для вдосконалення методів оцінювання екологічного стану.

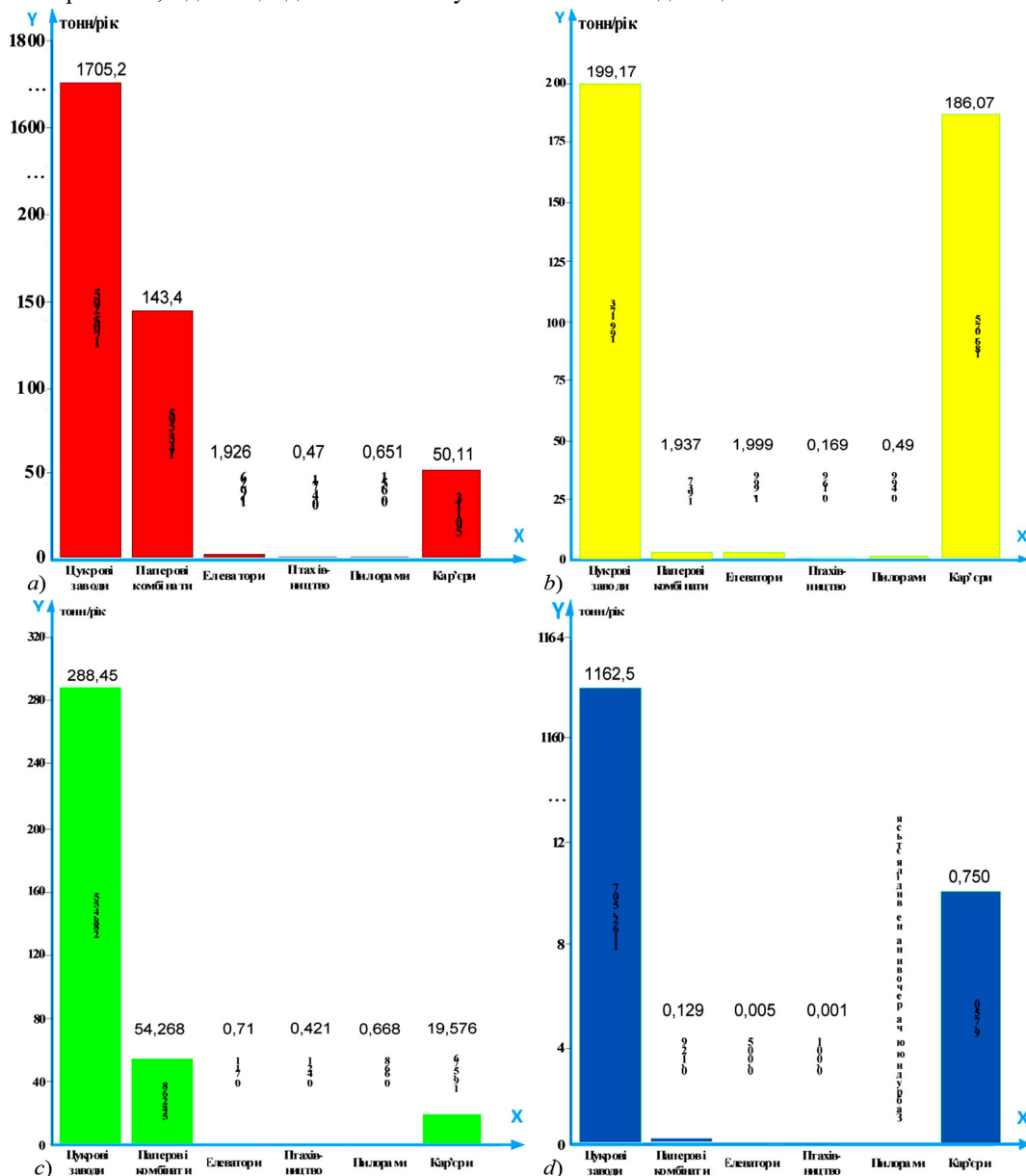


Рис. 13. Графіки валових викидів шкідливих речовин різними підприємствами за 2023 р. / Graphs of gross emissions of harmful substances by various enterprises for 2023

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено методика оцінювання екологічного стану середовища техногенного виробництва з використанням інформаційних і лазерних технологій, що забезпечить, згідно з концепцією киснево-вуглецевого балансу, підвищення точності моніторингу шляхом використання лазерних сенсорів для визначення концентрації шкідливих викидів пилу і газу в реальному часі.

Практична значущість результатів дослідження – розроблену методика оцінювання екологічного стану середовища техногенного виробництва можна викорис-

тати під час створення інноваційної системи лазерного контролю та оцінювання екологічного стану техногенного середовища, яка дасть змогу поліпшити екологічну безпеку населення у районах їхнього перебування, в т.ч. й прилеглих до техногенних виробництв, завдяки ранньому виявленню критичних рівнів забруднення та розробленим рекомендаціям щодо запровадження локальних екологічних заходів.

Висновки / Conclusions

На підставі інформаційних і лазерних технологій оцінено стан екологічного середовища техногенного виробництва, яке є джерелом шкідливих викидів пилу і газу в атмосферу і водне середовище, їх хімічний склад

і концентрацію, що дало можливість визначити рівень загроз довіллю. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано проблему захисту екосередовища техногенних і соціальних систем, встановлено нові вимоги до систем контролю атмосфери і водного середовища, ґрунтів, соціально просторово розподілених систем. На підставі розробленої концепції киснево-вуглецевого балансу показано, що якість життєвого простору можна значно підвищити, якщо з урахуванням нових факторів захисту правильно сформулювати вимоги до техногенних систем, до їх функціонування та моніторингу впливу на екосередовище.
2. Вирішено проблему ефективного лазерного моніторингу забруднення шкідливими газовими і пиловими викидами в атмосфері, ґрунті, водосховища, полів, лісів і лук на підставі нових методів контролю концентрації хімічних і пилових забруднень, що забезпечить якість життєвого простору і зменшить рівень техногенних загроз. Для вирішення проблеми моніторингу впливу на екосередовище проведено її декомпозицію на комплексні завдання, які є основою підвищення якості контролю техногенного виробництва на підставі концепції киснево-вуглецевого балансу.
3. Виявлено недоліки та обґрунтовано проблему дослідження забруднення довкілля на підставі розробленої концепції киснево-вуглецевого балансу в атмосфері та екологічному середовищі (біоценоз), обґрунтовано положення про важливість моніторингу пилоповітряних сумішей – продуктів техногенного виробництва, які, осідаючи на зелені насадження та рослинний світ, знижують рівень активності фотосинтезу кисню для поповнення глобальних ресурсів.
4. Відповідно до проблеми моніторингу забруднення технологічним пилом атмосфери, обґрунтовано проблему та методи створення інформаційних систем для екологічного моніторингу середовища з використанням методу лазерного зондування під час розроблення концентратомірів пилу і продуктів згорання. Розроблено методи оцінювання рівня концентрації забруднення повітря, технологічних середовищ, ґрунтів і вод та створено переносні та апаратні засоби вимірювання техногенного забруднення.
5. Розроблено структуру системи лазерного зондування шкідливих повітряно-газових сумішей у пилопроводах технологічних агрегатів енергоблоків, методи відбору проб та каналів зондування технологічного середовища, створеної схеми лазерних концентратомірів і експериментальні прилади. Виконано системний аналіз процесу зондування забруднення середовища шкідливими компонентами та побудовано інформаційну модель взаємодії лазерного променя з фізико-хімічними компонентами енергетично-просторових перетворень.
6. Розроблено інформаційно-енергетичну модель зондування та експериментальний стенд в комплексі (лазер – проба – фотоприймач – блок оброблення даних), який використано для досліджень проб, відібраних з екологічних середовищ (пилу, водні розчини, масляні). У процесі розсіяння фотонних потоків лазера розроблено методи прийому лазерних сигналів і способів оцінювання рівня концентрації забруднювача на фотонно-просторовій енергетичній взаємодії, інтенсивність якої залежить від рівня концентрації компонент забруднення хімічними і пиловими складовими в повітрі і водному розчині.
7. Обґрунтовано метод лазерного зондування динамічних турбулентних пилових потоків, породжених у процесі функціонування виробництва. Для підтвердження концепції можливостей методу лазерного зондування проведено експерименти з оцінювання забруднення екологічного середовища техногенних структур на підставі

використання сертифікованих аналітичних приладів (ОКСИ 5М). Показано, що стандартні прилади не забезпечують моніторинг пилового забруднення, що є великою проблемою екологічного моніторингу. Розроблений метод лазерного моніторингу пилового середовища атмосфери може забезпечити новий підхід для проектування захисту екосистем і соціальної інфраструктури на підставі підвищення якості лісових і паркових насаджень та модернізації виробництв.

References

1. Barankevych, M. M. (2008). Expert methods in decision-making: Text of lectures. Lviv: Publishing center of Ivan Franko National University of Lviv, 214 p. [In Ukrainian]. URL: <http://elar-tu.tntu.edu.ua/handle/lib/34139>
2. Bochko, Olena, Zarichna, Olena, & Kuziak, Viktoria. (2024). Transformation of business ecosystems of the energy sector enterprises. *Development management*, 23(1), 62–71. <https://doi.org/10.57111/devt/1.2024.62>
3. Boyko, V. I., Vovna, O. V., Zori, A. A., & Porev, V. A. (2013). Devices and Systems of Environmental Monitoring (Introduction to the Profession): [textbook], 3rd ed., supplement. and recycled. Donetsk: DonNTU, 292 p. [In Ukrainian]. URL: <http://ivstem.kpi.ua; https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100715>
4. Chaligava, O. I., Zinicovscaia, T., Peshkova, Al., Yushin, N., Frontasyeva, M., & Verge, K. (2024). Makhabbat Nurkassimova 5 and Liliana Cepoi 2, Major and Trace Airborne Elements and Ecological Risk Assessment: Georgia Moss Survey 2019–2023. *Plants* 13, article ID 3298. <https://doi.org/10.3390/plants13233298>
5. Dmitriev, M. G., Kaznina, N. I., & Pinichina, I. A. (1989). Sanitary-chemical analysis of pollutants in the surrounding delirium. Moscow: Khimiya, 368 p. [In Russian]. URL: <http://opac1.flib.sci.am/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=59403; https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106727>
6. Dorozhovets, M. (2007). Elaboration of measurement results. Lviv: VNU LP, 624 p. [In Ukrainian].
7. Dorozhovets, M. M., Ivakhiv, O. V., & Mokrytskyi, V. V. (2009). Unifying converters of information support of mechanotropic systems. Lviv: VNU "Lviv Polytechnic", 453 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.101023>
8. DSTU 3041-95. System of standards in the field of environmental protection and rational use of resources. Hydrosphere. Use and protection of water. Terms and definitions. Effective from 01.07.1996. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=74302
9. Egbewole, Bamise I., Olojo, Adedayo, & Oladapo, Bankole I. (2024, December). Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*, Vol. 12, article ID 100114. <https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114>
10. Fenii, N. S., & Hrytsiuk, Y. I. (2020). Automation of the process of classification of text news from internet sites by neural network methods. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(4), 123–133. <https://doi.org/10.36930/40300421>
11. Fraden, J. (2016). Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications, Springer, Berlin, Germany, 731 p. <https://doi.org/10.101.1007/978-1-4419-6466-3>
12. Gokhberg, Zh. L., & Zakharov, M. S. (1986). Methods and devices for automatic control of TEC emissions. Moscow: Energoatomizdat, 144 p. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100919>
13. Gotra, Z. Y. (1995). Sensors: a reference book. Lviv: Kameniar, 312 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117980>
14. Gotra, Z. Y. (2001). Elements of the theory of microelectronic sensors. Lviv: Liga-Press, 636 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108865>
15. Grytsiuk, P. Y., Ivanyshyn, A. V., & Hrytsiuk, Y. I. (2023). Quality assurance of software products in accordance with IEEE 730-2014 standard within the project implementation lifecycle. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(2), 101–117. <https://doi.org/10.36930/40330214>

16. Hrytsiuk, Y. I. (2022). Features of giving preference to the characteristics of the software product quality model. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(3), 79–102. <https://doi.org/10.36930/40320313>
17. Kissling, W. Daniel, Shi, Yifang, Wang, Jinhu, Walicka, Agata, George, Charles, Moeslund, Jesper E., & Gerard, France. (2024, December). Towards consistently measuring and monitoring habitat condition with airborne laser scanning and unmanned aerial vehicles. *Ecological Indicators*, Vol. 169, article ID 112970. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112970>
18. Kunze, Kh. I. (1989). Methods of physical measurements. Moscow: Mir, 216 p. [In Russian]. URL: <http://libarch.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/67599>
19. Kushnir, O., Kurchak, Y., Lutsiv-Shumsky, L., & Rykhluk, S. (2009). Experimental optics. Lviv: VTs LNU im. Iv. Franko, 465 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1039/d4gc03250k>
20. Lomnytska, Y. F., & Chaban, N. F. (2009). Chemical and physico-chemical methods of analysis in environmental research. Lviv: VC. LNU im. Iv. Franko, 304 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103178>
21. Lysa, N. K. (2020). Information technologies for the creation of environmental monitoring systems of regional man-made structures. Lviv: Ukrainian Academy of Printing, 224 p. [In Ukrainian].
22. Lysa, N. K., Sikora, L. S., & Durnyak, B. V. (2018). Strategic Analysis of Technogenic Risks, Information and System Components of the Problem of Creating Eco-Monitoring Structures. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(6), 152–158. <https://doi.org/10.15421/40280630>
23. Lysa, N. K., Sikora, L. S., Fedina, B. I., & Tkachuk, R. L. (2018). Information Technologies of Identification and Diagnostics of the Level of Concentration of Harmful Emissions of Man-Made Systems into the Ecological Environment Using Laser ZD Concentrators. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(7), 109–119. <https://doi.org/10.15421/40280724>
24. Moore, K. (1983). Application of Lasers in Spectroscopy and Photochemistry. Lane. from English. Moscow: Publishing house "Mir", 272 p. [In Russian]. URL: <https://violity.com.ua/109888028-k-mur-primenenie-lazerov-v-spektroskopii-i-fotohimii-himiya>; <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.30046>
25. Mykytyn, G. V., Dudykevych, V. B., & Bobalo, Y. Y. (2019). Strategic Security of the "Object – Information Technology" System. Lviv: NU "LP", 580 p. [In Ukrainian].
26. Olawade, David B., Wada, Ojima Z., Ige, Abimbola O.,
27. Pogrebennyk, V. D., & Romanyuk, A. V. (2013). Computer-measuring information systems for operational environmental monitoring of the aquatic environment. Monograph. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 160 p. [In Ukrainian]. URL: <https://vlp.com.ua/node/11946>
28. Polishchuk, E. S., Dorozhovets, M. M., Ivakhiv, O. V., Boyko, T. G., & Kovalchuk, A. (2008). Means and methods of measuring non-electrical quantities. Lviv: Publishing house "Beskyd Bit", 618 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2024.101472>
29. Polishchuk, E. S., Dorozhovets, M. M., Yatsuk, V. O., Boyko, T. G., & Vanko, V. M. (2003). Metrology and measuring equipment. Textbook for students of higher educational institutions of electrical engineering specialties (stamp of the Ministry of Education of Ukraine). Lviv: Beskyd-bit, 544 p. [In Ukrainian].
30. Porter, J., Arzberger, P., Braun, H., Bryant, P., & Stuart, G. (2005). Wireless Sensor Networks for Ecology. *BioScience*, 55(7), 561–572. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0561:WSNFE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0561:WSNFE]2.0.CO;2)
31. Porter, J., Nagy, E., Timothy, K., Hanson, P., Collins, L., & Arzberger, P. (2009). New Eyes on the World: Advanced Sensors for Ecology. *BioScience*, 59(5), 385–397. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.5.6>
32. Primak, A. V. (1991). Environmental protection at construction industry enterprises. Kyiv: Budivelnik, 152 p. [In Ukrainian].
33. Primak, A. V., Kafarov, V. V., & Kachishvili, K. I. (1999). System analysis of air and water quality control and management. Kyiv: Science, 360 p. [In Russian]. URL: <http://opac1.flib.sci.am/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=61141>
34. Rudavskiy, Y. K. (1993). Mathematical Methods in Chemistry and Chemical Technology Lviv: Publishing house Svit, 204 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1139/facets-2022-0192>
35. Sabadash, V. V., Petrusha, I. M., Malovany, M. S., & Nagursky, O. A. (2014). Energy, radiation safety and environmental protection from physical pollution. General course. Study. Manual. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 296 p. [In Ukrainian]. URL: <https://vlp.com.ua/node/13291>
36. Sayenko, Y. I. (1999). Modeling of indicators of social infrastructure development. Ph.D. Opinion, 165 p. [In Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tiru_2013_36_31
37. Sikora, L. S. (1998). Laser Information and Measuring Systems for Management of Technological Processes. Lviv: Kamenyar, 445 p. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.128>
38. Sikora, L. S. (1998). Systemology of decision-making for management in complex technological structures. Lviv: Kamenyar, 453 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822521-9.00207-0>
39. Sikora, L. S., & Lysa, N. K. (2019). Information and laser technologies for the creation of environmental monitoring systems of energy-active man-made production structures. Lviv: Ukrainian Academy of Printing, 370 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126080>
40. Sikora, L. S., Lysa, N. K., & Miyushkovich, Yu. G. (2009). Integration of Information-Measuring Systems, DSS and Models of Expert Knowledge for Operational Support of Decision-Making in Emergency Situations at Potentially Dangerous Objects. *Institute for Modeling Problems in Energy*, 52, 166–175. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1007/s10115-009-0192-4>
41. Sikora, L. S., Lysa, N. K., & Vladyska, R. M. (2008). Models of laser diagnostics of technological media based on the balance method for controlling dust emissions in power units. *RFP, Institute for Modeling Problems in Energy*, 55, 168–171. [In Ukrainian].
42. Sikora, L. S., Omelyanovskiy, P. Y., & Lysa, N. K. (2009). Models of Integration of Measuring and Information Laser Systems for Evaluation of Parameters of the State of Technological Processes and Environment in Boundary Control Modes. *RFP, Institute for Modeling Problems in Energy*, 53, 201–209. [In Ukrainian].
43. Sikora, L. S., Vladyska, R. M., Miyushkovich, Yu. G., & Lysa, N. K. (2010). Weight method of calibration of laser balance concentrators for filling the database with fast access to the automated process control system with a power unit. *RFP, Institute for Modeling Problems in Energy*, 55, 174–181. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2024.11.006>
44. Suman. (2021) Air quality indices: A review of methods to interpret air quality status. *Materials Today: Proceedings*, 34(3), 863–868. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.141>
45. Tiwari, A., & Williams, I. (2019). *Air pollution: measurement, modelling and mitigation*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 514. <https://doi.org/10.1201/9780429469985>
46. Varzhapetyan, A. G. (1988). Automation of Water Environment Parameters Control. Leningrad: *Sudostroenie Publ*, 232 p. [In Russian]. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.125829>
47. Veseliak, V. V., & Hrytsiuk, Y. I. (2024). Machine learning methods in epidemiological research. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(4), 59–67. <https://doi.org/10.36930/40340408>
48. Vitovska, I. V. (2023). Management activities in the field of environmental protection. *Scientific Information Bulletin of Ivano-Frankivsk University of Law named after King Danylo Halytsky: Journal. Pravo Series*. Ivano-Frankivsk: Editorial and Publishing Department of King Danylo University, 15(27), issue 1. 135–139. <https://doi.org/10.33098/2078-6670.2022.15.27.1.135-139>
49. Volodarsky, E. T., Malinovsky, B. N., & Tuz, Yu. M. (1987). Planning and organization of a measurement experiment. Kyiv: High school, 280. [In Ukrainian]. URL: <https://lib-bkm.ru/lo-ad/94-1-0-2470>; <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101298>
50. Vuytsyk, V., Gotra, O., & Gigoriev, V. (2006). Expert systems. Lviv: Liga-Press, 290 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.aj.2024.11.069>

51. Weisband, M. D., & Propenko, V. I. (1986). Technique of metrological work. Kyiv: Technics, 168 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112421>
52. Yurynets, E. V., & Yurynets, R. V. (2012). Automated Information Systems and Technologies. Lviv: View of LNU. Ivan Franko, 698 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343544>
53. Zaporozhets, A. O. (2019). Air pollution monitoring system to monitor the functioning of power engineering facilities. *9a National Scientific and Technical Conference "Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics"*. Kyiv (November 19-21), 155–160. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2>
54. Zerkalov, D. V. (2007). Environmental Safety: Management, Monitoring, Control. Kyiv: CST Dakor, Osnova, 412 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110760>
55. Zinchuk, V. K., Levytska, G. D., & Dubenska, L. O. (2008). Physicochemical methods of analysis. Lviv: VTs LNU im. Iv. Franko, 362 p. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110269>

L. S. Sikora, N. K. Lysa, N. A. Khylyak

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

INFORMATION AND LASER TECHNOLOGIES FOR ASSESSING THE OXYGEN-CARBON BALANCE OF ENVIRONMENTAL POLLUTION

The current stage of development of the production of electricity, chemical, machine-building, printing products is characterized by the fact that a wide range of resource components are used – coal, oil, gas, paints, polymers, which are environmentally aggressive. Stressful production regimes dictated by the market lead to a sharp increase in the consumption of resources for energy-active production processes, causing, in turn, an increase in the concentration of emissions of dust and harmful gases and liquids into the atmosphere and aquatic environment. This leads to an increase in environmental pollution, the state of which cannot always be quickly assessed in real time with the complexity of data selection by standard methods and assess the threat of situations. Solving the problem of integrated eco-monitoring and developing optimal strategies for managing technological modes that would ensure high productivity and minimize harmful emissions is based on modern system and information technologies, the creation of new types of sensors for information and measurement systems. The processing of technological data is the basis for forming an assessment of the image of the environmental situation and the state of production for decision-making. The processing of technological data is the basis for forming an assessment of the image of the environmental situation and the state of production for decision-making. The selection of additional data on environmental pollution, which should be supplemented with data with the involvement of expert knowledge, which, accordingly, provides an information base for determining the level of threats of emissions of polluting components of production into the ecosystem and requires the development of new methods of protection and environmental monitoring. To control the technological state of production processes and the ecological environment, it is necessary to have a complex of information and measurement systems that provide the selection of heterogeneous data from objects and the ecological environment, assessment of state parameters, information technologies for interpreting images of situations formulated from blocks of selected terminal data and identifying their intellectual content in relation to the target state of the technogenic production and ecological complex. An important aspect of this problem is the search for methods of data registration and their long-term storage in relation to normal and emergency situations, because without solving this problem, data, engineering knowledge about ways to eliminate threats and accidents, methods of making effective emergency solutions and ways to eliminate the consequences of accidents and catastrophes in technogenic and socio-communal structures of the ecological regional system are lost in time.

Keywords: ecosystem; atmosphere; dust; information technology; control; lasers; environmental safety; sensors; measurement; concentration; pollution; harmful substances.