

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з наукової роботи
Інституту загальної енергетики НАН

України

канд. техн. наук, ст. наук. співроб.



Сергій ШУЛЬЖЕНКО

4 липня 2022 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів докторської дисертації Запорожця Артура Олександровича

Рецензенти у складі

член-кор. НАН України Н.М. Фіалко;

член-кор. НАН України О.В. Новосельцев;

д-р техн. наук, ст. наук. співр. Л.Ф. Жуков

розглянувши докторську дисертацію канд. техн. наук, ст. досл. Запорожця Артура Олександровича на тему: «Науково-практичні засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики» та наукові публікації, в яких висвітлені основні наукові результати докторської дисертації, а також за результатами фахового семінару (протокол №1 від 23.06.2022 року) прийняли наступний висновок, по якому визнали:

Актуальність теми дослідження. Забруднення атмосфери стало складовою частиною сучасного життя. Основним джерелом забруднення атмосфери на теперішній час можна вважати процеси горіння, що пов'язані з діяльністю енергоємних підприємств. Домішки, що містяться в паливі, відхилення від стехіометричного складу суміші «паливо - повітря» при горінні, а також занадто висока або занадто низька температура горіння призводять до збільшення утворення таких побічних продуктів, як монооксид вуглецю, оксиди сірки та азоту, сажі, незгорілі вуглеводні та ін. Всі ці речовини вносять вклад в забруднення атмосфери.

Незважаючи на достатньо диверсифікований енергетичний баланс, енергоємні підприємства, зокрема ТЕС, ТЕЦ, котельні тощо, споживають близько третини видобутого палива. Частка викопного палива (вугілля, торф,

газ), що використовується для генерування електричної енергії, складає більше 60%, при тому, що цей тренд має тенденцію до зростання. Тому об'єкти енергетики, в тому числі і теплоенергетики, як однієї з найбільших споживачів енергетичних ресурсів, залишаються одними з найбільших забруднювачів навколишнього середовища, зокрема і повітря.

Об'єкти енергетики відносяться до кола критично важливих та потенційно небезпечних об'єктів. Виконання міжнародних та державних програм по захисту навколишнього середовища (особливо середовища в місцях розміщення об'єктів енергетики) вимагає проведення постійного контролю за станом забруднення повітря. Крім того, організація такого контролю є важливою ланкою в переліку заходів щодо підтримки енергетичної безпеки будь-якої країни.

На теперішній час переважна кількість систем контролю забруднення повітря в околі об'єктів енергетики функціонують з використанням стаціонарних наземних пунктів, що використовують морально застарілий методологічний та апаратно-програмний інструментарій. До недоліків таких систем можна віднести неможливість визначення рівня забруднення повітря на різних висотах; недостатня кількість постів спостереження для формування полів забруднення; низька якість даних; низький рівень інформативності; недостатня швидкість реагування при виникненні надзвичайних ситуацій.

Проблематиці контролю забруднення повітря об'єктами енергетики присвячено багато досліджень. Вагомий внесок у розвиток цього напрямку зробили закордонні та українські вчені: M. Alexandre, M. Badura, M. Bart, L. Bertrand, C. Borrego, N. Castell, M. Gerboles, P. Kumar, A. Lewis, X. Liu, L. Morawska, D. Oletic, X. Pang, R. Piedrahita, L. Spinelle, L. Sun, D.E. Williams, Y. Zhang, В.П. Бабак, В.О. Артемчук, А.Н. Некос, О.О. Попов, М.М. Харитонов, А.В. Яцицин та ін.

Дослідження цих вчених акцентують увагу на необхідності розвитку методологічного та апаратно-програмного забезпечення контролю забруднення повітря, що дозволить попередити позаштатні ситуації на енергоємних підприємствах (зокрема об'єктах енергетики), знизити рівень екологічного навантаження урбанізованих територій, виявити джерела надлишкового забруднення повітря та в цілому покращити рівень життя населення.

Одним із важливих аспектів цього розвитку є необхідність створення умов для безперервного збору та аналізу даних про стан повітря з необхідними частотою опитування сенсорів і просторовим охопленням. Тому створення

теоретичних засад, розроблення та практичного застосування засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що забезпечує локалізацію джерел забруднення повітря на базі просторово розгалужених бездротових сенсорних мереж, є актуальною науково-прикладною проблемою, що потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, державної екологічної політики України та наукових досліджень Національної академії наук України. Робота за темою дисертації виконувалась згідно плану наукових досліджень в Інституті технічної теплофізики НАН України, Національному авіаційному університеті та Інституті загальної енергетики НАН України в межах наступних НДР: «Розроблення програмного середовища регресійного аналізу ретроспективної інформації та інтеграція його в інформаційно-аналітичні системи моніторингу та аналізу режимів функціонування об'єктів теплоенергетики» (№ ДР 0217U007043, 2017 р.); «Розроблення методики моніторингу теплового стану магістральних тепломереж на базі квадрокоптерів» (№ ДР 0117U003694, 2017-2018 рр.); «Розвиток науково-практичних засад моніторингу довкілля та технічного стану об'єктів теплоенергетики на базі безпілотних авіаційних комплексів» (№ ДР 0117U000760, 2017-2021 рр.); «Розроблення макету системи діагностування та аналізу стану котельного устаткування на базі сучасних GRID-технологій для обробки ретроспективної інформації з об'єктів моніторингу» (№ ДР 0219U005077, 2018 р.); «Підвищення експлуатаційних характеристик палив для газотурбінних двигунів, безпеки авіаційного транспорту та його екологічності» (№ ДР 0118U003369, 2018 р.); «Інтерактивна діагностика фітоценосистем із застосуванням БПЛА для оцінки впливу на довкілля» (№ ДР 0117U004331, 2018 р.); «Розвиток наукових засад термогазодинаміки енергетичних установок та моніторингу викидів забруднюючих речовин» (№ ДР 0118U002283, 2018-2019 рр.); «Розроблення системи моніторингу мікрокліматичних показників та стану забруднення атмосферного повітря екосистем Північного Причорномор'я» (№ ДР 0119U100550, 2019-2021 рр.); «Розроблення системи моніторингу рівня шкідливих викидів ТЕС та діагностування обладнання електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії, на базі Smart Grid, з урахування їх спільної роботи» (№ ДР 0119U101859, 2019-2021 рр.); «Розроблення методів і засобів підвищення екологічної ефективності та

довговічності димових труб теплоенергетичних установок. Етап 1. Дослідження ефективності застосування комплексних методів захисту димових труб котлоагрегатів на основі уточнених даних щодо зовнішньої аеродинаміки і теплообміну цих труб та розроблення адаптивних методів моніторингу концентрації забруднюючих речовин на базі бездротових сенсорних мереж» (№ ДР 0120U101123, 2020 р.); «Розроблення апаратно-програмного комплексу моніторингу атмосферного повітря урбанізованих територій в рамках концепції Smart City» (№ ДР 0121U111148, 2020-2021 рр.); «Розроблення методів і засобів підвищення екологічної ефективності та довговічності димових труб теплоенергетичних установок. Етап 2. Аналіз режимів роботи димових труб промислових печей при застосуванні комплексу методів і заходів підвищення їх теплової та екологічної ефективності на основі моделювання зовнішньої аеродинаміки і теплообміну труб з урахуванням наземної інфраструктури теплоенергетичних установок та створення і випробовування дослідного зразка інформаційно-вимірювальної системи моніторингу концентрації забруднюючих речовин. Розроблення та впровадження рекомендацій за результатами досліджень» (№ ДР 0121U109243, 2021 р.); «Дослідження технічного стану промислових конструкцій та основних методів їх діагностування з використанням ієрархічних систем» (№ ДР 0121U110307, 2021 р.); «Удосконалення ієрархічної системи математичних та програмно-інформаційних засобів для дослідження напрямів розвитку об'єднаних енергосистем в умовах переходу до низьковуглецевої економіки» (№ ДР 0122U000236, 2022 р.); «Розвиток математичних моделей та засобів інформатики визначення перспективної структури та обсягів розвитку традиційної і відновлюваної електроенергетики за умов її декарбонізації та впровадження принципів кліматичної нейтральності в Україні» (№ ДР 0120U100136, 2022 р.), в яких автор брав участь як керівник, відповідальний виконавець та виконавець.

Конкретна особиста участь автора в одержанні результатів.

Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому автором розвинуті науково-практичні основи створення, дослідження та практичного використання засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики. Робота базується на застосуванні різних методологічних підходів та математичного інструментарію. Автором розроблено та удосконалено ряд апаратно-програмних засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що дозволяє локалізувати джерела

забруднення та комплексно визначити їх вплив на стан навколишнього середовища. Висновки та положення, викладені в тексті роботи, отримані автором самостійно.

Наукові положення та результати, які виносились на захист кандидатської дисертації Запорожця А.О. на тему «Комп'ютеризована система контролю процесу спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності», на захист у представленій докторській дисертації не виносяться.

Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень, представлених у дисертаційній роботі, наведено у наукових працях, поданих у списку публікацій.

Мета дослідження – розвиток науково-технічних засад побудови, практичного використання та дослідження засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики та локалізація джерел забруднення на базі просторово розгалужених бездротових low-cost сенсорних мереж.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний рівень споживання різних видів енергоресурсів в Україні та світі, і дослідити вплив енергоресурсів, та галузей, що їх споживають, на забруднення атмосферного повітря.
2. Провести аналіз сучасного методологічного та апаратно-програмного забезпечення системи контролю забруднення повітря та дослідити стан хімічного забруднення повітря в Україні.
3. Розробити концепцію системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики на базі просторово-розгалуженої бездротової low-cost сенсорної мережі.
4. Розвинути методологію формування результату контролю досліджуваної характеристики з використанням фізичних та ймовірнісних мір.
5. Розробити математичні моделі для визначення та прогнозування інформаційних параметрів системи контролю забруднення повітря, які дозволяють локалізувати джерела забруднення.
6. Розробити узагальнену ієрархічну структуру системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.
7. Запропонувати конструктивні рішення вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря для підвищення рівня інформативності про стан функціонування різних типів енергоємних об'єктів.
8. Дослідити відтворюваність результатів контролю мілкодисперсного

пилу low-cost сенсорами для обґрунтування можливості їх використання в системі контролю забруднення повітря.

9. Провести оцінювання динамічних статистичних характеристик low-cost сенсорів та запропонувати інформативні параметри для визначення технічного стану сенсорів системи контролю забруднення повітря.

10. На основі проведених досліджень сформувані перспективні напрями розвитку методологічного та апаратно-програмного забезпечення контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

Об'єкт дослідження – процес контролю забруднення повітря об'єктами енергетики та локалізація джерел забруднення.

Предмет дослідження – методи, моделі та засоби контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених наукових завдань комплексно були використані методи: теорії інформаційно-вимірювальних систем, теорії електротехнічного приладобудування, теорії керування, теорії вимірювань, теорії випадкових процесів, фізичного та математичного моделювання, теорії ймовірностей, теорії алгоритмів, математичної статистики, планування багатофакторного наукового експерименту, обробки та верифікації його результатів тощо.

Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна:

1. Удосконалені науково-практичні засади статистичного дослідження впливу складових енергетичного балансу (типів спожитих енергоносіїв, галузей, що їх споживають, і секторів перетворення) на викиди забруднюючих речовин у повітря (CO_2 , SO_2 , NO_2 , CO , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}) із використанням статистичної оцінки коефіцієнта їх кореляції за малих обсягів досліджуваних вибірок, що дало змогу встановити функціональні та кореляційні зв'язки між досліджуваними параметрами, та визначити пріоритетні об'єкти, що потребують впровадження системи контролю забруднення повітря.

2. Вперше запропоновано ітераційний метод розв'язання оберненої задачі розповсюдження забруднюючих речовин у повітрі, а саме локалізації джерела забруднення та визначення концентрації його викидів, із використанням розроблених оптимізаційних моделей та модифікованого методу Ньютона, який передбачає заміну розв'язання системи нелінійних рівнянь процедурою

пошуку розв'язку послідовності систем алгебраїчних рівнянь, що дало змогу підвищити стійкість розробленого методу та більше ніж в 3 рази зменшити обчислювальну складність (у порівнянні із застосуванням класичного методу Ньютона), і, як наслідок, скоротити час локалізації джерел забруднення та створити передумови попередження значного забруднення атмосферного повітря.

3. Вперше розроблено метод прогнозування концентрації кисню в повітрі, що базується на аналізі метеорологічних параметрів повітря (температури, відносної вологості, абсолютного тиску), із застосуванням оберненої функціональної залежності, встановленої за допомогою дискретного перетворення Фур'є, що дає можливість оптимізувати процес спалювання палива на енергоємних підприємствах за коефіцієнтом надлишку повітря та зменшити викиди забруднюючих речовин.

4. Вперше запропоновано матричний метод формування даних вимірювальних модулів для контролю забруднення атмосферного повітря, що ґрунтується на деталізації властивостей сформованих груп даних та відповідних мір (Евклідової відстані, квадрату Евклідової відстані, Манхеттенської відстані, відстані Чебишова чи степеневі відстані), що дає змогу кількісно оцінити вимірювальні параметри системи контролю та сформувані профілі ретроспективних даних для вибраних об'єктів.

5. Вперше запропоновано набір лінійних регресій як функцій залежності даних вимірювань від еталонного пристрою для градування сенсорів дрібнодисперсного пилу, що встановлюють зв'язок між характеристиками даних вимірювальних модулів (максимальне, мінімальне, середнє значення, середнє квадратичне відхилення) та відповідними даними еталонного засобу контролю (ВАМ-пристрою), що дало змогу обґрунтувати застосування low-cost сенсорів у розроблених засобах контролю.

6. Розвинуті науково-практичні аспекти оцінювання технічного стану сенсорів вимірювальних модулів багатоканальних мереж контролю забруднення повітря із використанням ряду статистичних мір розсіювання (коефіцієнта детермінації R^2 , коефіцієнта кореляції r , розмаху R та коефіцієнта варіації C_v) як динамічних статистичних характеристик, що дозволяє встановити ступінь варіативності результатів контролю, підвищити достовірність контролю за рахунок завчасного виявлення технічно несправних сенсорів.

7. Отримала подальший розвиток методологія створення систем контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що базується на

сучасній теорії використання моделей інформаційних полів та статистичних методах опрацювання даних, що дало можливість обґрунтувати вимоги до вимірювальних модулів системи контролю та запропонувати сукупності фізичних та ймовірнісних характеристик розроблених апаратно-програмних засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

Теоретичне значення одержаних результатів полягає у тому, що вперше на основі розроблених методів, алгоритмів та підходів запропоновано концепцію створення та використання системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що дозволило локалізувати джерела забруднення та комплексно встановити їх вплив на стан навколишнього середовища.

Запропоновано метод локалізації джерела забруднення повітря та визначення його параметрів (висоти та концентрації викидів) на базі даних від розгалуженої сенсорної мережі та із використанням розроблених оптимізаційних моделей та модифікованого методу Ньютона, що дало змогу більше ніж в 3 рази зменшити складність обчислень, та значно скоротити час локалізації джерел забруднення.

Розвинуто положення оцінювання технічного стану сенсорів концентрації забруднюючих речовин із використанням статистичних мір (коефіцієнта детермінації R^2 , коефіцієнта кореляції r , розмаху R та коефіцієнта варіації C_v), що дозволило підвищити достовірність контролю шляхом завчасного виявлення несправних сенсорів.

Практичне значення одержаних результатів. До результатів, що мають найбільшу практичну цінність, належать:

1. Розроблено систему контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що дозволило комплексно оцінити вплив енергоємних підприємств на екологічний стан навколишнього середовища.

2. Розроблено ряд вимірювальних модулів, що базуються на використанні low-cost сенсорів метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску) та забруднюючих речовин (мілкодисперсний пил (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10}), CO , CO_2 , NO_2 , SO_2 , CH_2O , NH_3 та ін.), що дозволило реалізувати просторово-розгалужену бездротову сенсорну мережу для контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

3. Створено ієрархічну структуру системи контролю забруднення повітря, що дозволило виділити бази даних екологічної інформації та надати до них доступ відповідним групам користувачів, а також сформулювати зворотній

зв'язок від центрів прийняття рішень до об'єктів контролю, що дозволяє регулювати кількість забруднюючих речовин, що надходить у повітря.

4. Розроблено програмне забезпечення системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що дозволяє зберігати, опрацьовувати та аналізувати отримані дані, спростити доступ користувачів до екологічної інформації, підвищити кількість інформативних параметрів, завчасно інформувати про аномальні збільшення контролюючих параметрів, локалізувати джерела забруднення та в цілому підвищити рівень інформативності системи контролю.

5. Проведено експериментальні дослідження статистичних характеристик сенсорів вимірювальних модулів, що дозволило обґрунтувати їх використання для системи контролю забруднення повітря.

6. Запропоновано інформативні критерії для оцінювання справності сенсорів системи контролю, що дало змогу визначити несправні сенсори, попередити використання неякісних даних, встановити та попередити аномальні режими функціонування об'єктів контролю, та в цілому визначити технічний стан системи контролю забруднення повітря об'єктів енергетики.

Використання результатів роботи. Результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема:

- структура вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря та математичні методи відбору інформативних ознак функціонування теплоенергетичних об'єктів впроваджено в ТОВ НВП «Машинобудування» (м. Дніпро, акт від 23 листопада 2017 р.);

- алгоритми, схеми, методи та програмне забезпечення багаторівневої системи моніторингу енергетичного обладнання впроваджено в ДП «Завод «Електроважмаш»» (м. Харків, акт від 23 жовтня 2018 р.), ТОВ «Укрекоконсалт» (м. Київ, акт від 18 грудня 2018 р.);

- вимірювальний модуль системи екологічного моніторингу стану забруднення навколишнього повітря та метод непрямого вимірювання концентрації кисню в повітря впроваджено на ТОВ «Буд-Буд» (м. Лубни Полтавської області, акт від 2 вересня 2019 р.), ТОВ «Передові мембранні технології» (м. Київ, акт від 27 листопада 2019 р.);

- моделі прогнозування концентрації складових повітря на базі дискретного перетворення Фур'є та ретроспективної інформації впроваджено в ТОВ «Науковий парк Державної екологічної академії

післядипломної освіти та управління «ЧОРНОБИЛЬ»» (м. Київ, акт від 14 грудня 2021 р.);

- теоретичні та практичні результати, що представлені в монографіях «Diagnostic Systems For Energy Equipments», «Control of Fuel Combustion in Boilers», «Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)», «Models and Measures in Measurements and Monitoring», впроваджені в навчальний процес кафедри хімії і хімічної технології Національного авіаційного університету (м. Київ, акти від 3 грудня 2019 р. та 10 грудня 2020 р.) та кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет» (акти від 15 грудня 2021 р.).

Повнота викладення матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача. Зміст дисертаційної роботи відображено в 50 наукових працях, зокрема, 24 публікаціях, що відображають основний зміст дисертації, в тому числі в наукових (в тому числі електронних) фахових виданнях України та інших держав, з яких: 2 монографії, 15 публікацій у наукових періодичних виданнях інших держав та 5 публікацій у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз (зокрема Scopus та Web of Science); 2 патентів України (зокрема, 1 – на винахід), а також 16 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференцій. 10 публікацій додатково відображають зміст дисертаційної роботи.

Перелік публікацій.

Публікації, які відображають основний зміст дисертації:

1. Babak, V. P., Babak, S. V., Myslovych, M. V., **Zaporozhets, A. O.**, Zvaritch, V. M. (2020). *Diagnostic Systems For Energy Equipments*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3>. ISBN 978-3-030-44442-6

2. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, V.S., Kuts, Yu. V., Myslovych, M.V., Scherbak, L.M., **Zaporozhets, A.O.** (2021). *Models and Measures in Measurements and Monitoring*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>. ISBN 978-3-030-70782-8

3. **Zaporozhets, A.O.**, Redko, O.O., Babak, V.P., Eremenko, V.S., Mokiychuk, V.M. (2018). Method of indirect measurement of oxygen concentration in the air. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 105-114. <http://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/14> (**Scopus, Q2**, ISSN 2223-2362).

4.Zaporozhets, A., Eremenko, V., Serkiienko, R., Ivanov, S. (2019). Methods and Hardware for Diagnosing Thermal Power Equipment Based on Smart Grid Technology. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 871, 476-489. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01069-0_34 (*Scopus, Q3*, ISSN 2194-5365).

5.Babak, S., Babak, V., **Zaporozhets, A.**, Sverdlova, A. (2019). Method of Statistical Spline Functions for Solving Problems of Data Approximation and Prediction of Objects State. *CEUR Workshop Proceedings*, 2353, 810-821. <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper64.pdf> (*Scopus*, ISSN 1613-0073).

6.Eremenko, V., **Zaporozhets, A.**, Isaenko, V., Babikova, K. (2019). Application of Wavelet Transform for Determining Diagnostic Signs. *CEUR Workshop Proceedings*, 2387, 202-214. <http://ceur-ws.org/Vol-2387/20190202.pdf> (*Scopus*, ISSN 1613-0073).

7.Zaporozhets, A., Eremenko, V., Redko, O. (2019). Metrological assessment of the indirect method of measuring the concentration of oxygen in the air. *Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*, 2019, 640-643. <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019506> (*Scopus*, ISSN 2160-1518)

8.Zaporozhets, A., Khaidurov, V. (2020). Mathematical Models of Inverse Problems for Finding the Main Characteristics of Air Pollution Sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(12), 563. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04933-z> (*Scopus Q2, Web of Science*, ISSN 1573-2932).

9.Zaporozhets, A., Babak, V., Isaienko, V., Babikova, K. (2020). Analysis of the Air Pollution Monitoring System in Ukraine. *Studies in Systems, Decision and Control*, 298, 85-110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_6 (*Scopus, Q4*, ISSN 2198-4190).

10.Zaporozhets, A. (2021). Correlation Analysis Between the Components of Energy Balance and Pollutant Emissions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(3), 114. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05048-9> (*Scopus Q2, Web of Science*, ISSN 1573-2932).

11.Sverdlova, A.D., **Zaporozhets, A.O.**, Bohachev, I.V., Popov, O.O., Iatsyshyn, A.V., Iatsyshyn, A.V., Kovach, V.O., Artemchuk, V.O., Hrushchynska, N.M. (2021). Self-organizing network topology for autonomous IoT systems. *CEUR Workshop Proceedings*, 2850, 57-70. <http://ceur-ws.org/Vol-2850/paper4.pdf> (*Scopus*, ISSN 1613-0073).

12.Rezinkina, M. M., Sokol, Y. I., **Zaporozhets, A. O.**, Gryb, O. G., Karpaliuk, I. T., Shvets, S. V. (2021). Monitoring of energy objects parameters with using

UAVs. *Studies in Systems, Decision and Control*, 359, 1-8. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69752-5_1 (*Scopus*, *Q4*, ISSN 2198-4190).

13. Zaporozhets, A., Babak, V., Sverdlova, A., Isaienko, V., Babikova, K. (2021). Development of a System for Diagnosing Heat Power Equipment Based on IEEE 802.11s. *Studies in Systems, Decision and Control*, 346, 141-151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_8 (*Scopus*, *Q4*, ISSN 2198-4190).

14. Babak, V., Scherbak, L., Kuts, Y., Zaporozhets, A. (2021). Information and measurement technologies for solving problems of energy informatics. *CEUR Workshop Proceedings*, 3039, 24-31. <http://ceur-ws.org/Vol-3039/short20.pdf> (*Scopus*, ISSN 1613-0073).

15. Sverdlova, A., Zaporozhets, A. (2021). Predicting anomaly conditions of energy equipment using neural networks. *E3S Web of Conferences*, 280, 09005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009005> (*Scopus*, ISSN 2267-1242).

16. Zaporozhets, A., Khaidurov, V., Tsiupii, T. (2022). Creation of High-Speed Methods for Solving Mathematical Models of Inverse Problems of Heat Power Engineering. *Studies in Systems, Decision and Control*, 399, 41-74. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_3 (*Scopus*, *Q4*, ISSN 2198-4190).

17. Zaporozhets, A.O., Sverdlova, A.D., Ivaschenko, T.G., Kovach, V.O., Artemchuk, V.O. (2022). Electronic circuits of measuring modules of air pollution monitoring system based on low-cost sensors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012016> (*Scopus*, ISSN 1755-1315).

18. Запорожец, А.А., Свєрдлова, А.Д. (2017). Особенности применения технологии Smart Grid в системах мониторинга и диагностирования теплоэнергетических объектов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 33-41. <http://doi.org/10.15407/tdnk2017.02.05>. ISSN 0235-3474 (*фахове видання*).

19. Запорожець, А.О., Свєрдлова, А.Д. (2017). Аналіз методів діагностування теплоенєргетичних об'єктів. *Наукоємні технології*, 35(3), 259-265. <http://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11846> (ISSN 2075-0781) (*фахове видання*).

20. Isaienko, V., Zaporozhets, A., Babikova, K., Gulevets, D., & Savchenko, S. (2019). Review of methods and means of monitoring the air pollution. *Proceedings of the National Aviation University*, 3(80), 61-70. <http://doi.org/10.18372/2306-1472.80.14275>. ISSN 1813-1166 (*фахове видання*).

21. Бабак, В.П., Запорожець, А.О., Куц, Ю.В., Щєрбак, Л.М. (2020). Моделі і міри в теорії та практиці вимірювань. *Тєплофізика та*

теплоенергетика, 42(4), 5-18. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2020.1>. ISSN 2663-7243 (фахове видання).

22.Gryb, O., Karpaliuk, I., Shvets, S., **Zaporozhets, A.** (2020). Recognition of corona discharge presence by acoustic system installed on unmanned aerial vehicle. *Proceedings of the National Aviation University*, 85(4), 46-52. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.85.15138>. ISSN 1813-1166 (фахове видання).

23.Пат. №117967, Україна, МПК G01R 31/01, G06F 17/18. Спосіб визначення взаємної кореляційної функції шумових сигналів / Бабак, В.П., **Запорожець, А.О.**, Мартинюк, Г.В., Щербак, Л.М.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 14.12.2016; опубл. 25.10.2018. Бюл. №20.

24.Пат. №149325, Україна, МПК G01N 27/00, G01N 27/10, G08B 25/00, F01B 25/04. Модульна сенсорна платформа / **Запорожець, А.О.**, Бабак, В.П., Сverdлова, А.Д.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 16.10.2018, опубл. 10.11.2021. Бюл. №45.

Публікації, які засвідчують апробацію результатів дисертації

25.Redko, A., **Zaporozhets, A.** (2017). Effect of changing oxygen concentration on formation of air-fuel mixture in aviation engines. *Abstract book of International Symposium on Sustainable Aviation 2017*, 10-13 September 2017. Kyiv: National Aviation University. P. 78.

26.**Запорожець, А.О.**, Сverdлова, А.Д. (2018). Розроблення вимірювальних модулів ієрархічної системи діагностування енергетичного обладнання на базі Smart Grid технологій. *Збірник тез XXXVI науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (до 100-річчя Національної академії наук України)*, 16 травня 2018 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С.65-66.

27.Іванов, С.О., Сергієнко, Р.В., **Запорожець, А.О.**, Бурова, З.А. (2018). Засоби підвищення ефективності виготовлення, контролю якості та спалювання палива з рослинної біомаси. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя»*, 23-25 травня 2018 р. Київ: НУБІП. С. 148-150.

28.**Zaporozhets, A.O.**, Eremenko, V.S., Serhiienko, R.V., Ivanov, S.A. (2018). Development of an intelligent system for diagnosing the technical

condition of the heat power equipment. *2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 11-14 September 2018. Lviv: «Vezha i Ko». P. 48-51. <http://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526742> (*Scopus, Web of Science*).

29. **Запорожець, А.О.**, Редько О.О. (2019). Концентрація кисню як інформативний параметр якості атмосферного повітря. *Збірник тез XXXVII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 15 травня 2019 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 60-61.

30. Бабак, В.П., **Запорожець, А.О.**, Свєрдлова, А.Д. (2019). Моніторинг забруднення повітря на базі розподілених мультисенсорних мереж. *Тези III Міжнародної науково-практичної конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг"*, 10 жовтня 2019 р. Київ: КНУТД. С. 13-14.

31. **Запорожець, А.О.** (2019). Система моніторингу забруднення повітря для контролю функціонування об'єктів енергетики. *Збірник доповідей 9-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019»*. Київ: УТ НКТД. С. 107-112.

32. **Запорожець, А.О.** (2020). Безпілотні літальні апарати для систем моніторингу в енергетиці та екології. *Збірник тез XXXVIII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 15 травня 2020 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 40-42.

33. **Запорожець, А.О.**, Мартинюк, І.Д., Куценко, В.О., Коваленко, О.М. (2021). Математичні засоби для оцінювання впливу золівдвалів на ґрунти та підземні води. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку»*, 11-21 березня 2021 р. Черкаси: Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького. С. 93-97.

34. **Запорожець, А.О.** (2021). Статистичний аналіз впливу енергетичного сектору України на забруднення атмосферного повітря. *Збірник тез XXXIX науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 12 травня 2021 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 98-100.

35. Яцишин, А., **Запорожець, А.**, Коваленко, В. (2021). Математичні засоби оцінки рівня забруднення атмосферного повітря від пиління золошлаковідвалів об'єктів теплоенергетики. *Матеріали IX Міжнародної*

науково-практичної Інтернет-конференції "Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні 2021", 13-14 травня 2021. Київ: НУБіП України. С. 181-184.

36.Свердлова, А.Д., **Запорожець, А.О.** (2021). Діагностування складних теплоенергетичних об'єктів із використанням нейронних мереж. *Матеріали XII Міжнародної онлайн-конференції "Проблеми теплофізики та теплоенергетики"*, 26-27 жовтня 2021 р. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України. С. 115.

37.Rezinkina M., Rezinkin, O., **Zaporozhets, A.** (2021). UAVs Application in Power Engineering. *2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*, 19-21 October 2021. Kyiv: IEEE. P. 161-164. <https://doi.org/10.1109/APUAVD53804.2021.9615423> (*Scopus*).

38.**Запорожець, А.О.** (2022). Дисперсійний аналіз в задачах моніторингу забруднення атмосферного повітря. *XL науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 11 травня 2022 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С.107-109.

39.**Запорожець, А.О.**, Свердлова, А.Д., Артемчук, В.О., Ковач, В.О., Куценко В.О. (2022). Вимірювальні модулі системи моніторингу забруднення атмосферного повітря на базі low-cost сенсорів. *XL науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 11 травня 2022 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С.112.

40.**Zaporozhets, A.**, Popov, O., Artemchuk, O., Kovach, V., Kutsenko, V. (2022). Air pollution monitoring system from energy objects based on mesh network. *3rd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters*, 24-27 May 2022. Kryvyi Rih: Kryvyi Rih State Pedagogical University. P. 35.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

41.Артемчук, В.О., Білан, Т.Р., Блінов, І.В., Декуша, О.Л., **Запорожець, А.О.**, Іванов, Г.А., Іванов, С.О., Ковач, В.О., Ковтун, С.І., Марасін, О.В., Мартинюк, О.В., Мірошник, В.О., Попов, О.О., Сімейко, К.В., Станиціна, В.В., Танкевич, С.Є., Щокіна, В.А., Яцишин, А.В., Яцишина, Т.М. *Теоретичні та прикладні основи економічного, екологічного та*

технологічного функціонування об'єктів енергетики. Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, 2017. ISBN 978-966-02-8331-2.

42. Babak, V., **Zaporozhets, A.**, Kovtun, S., Serhiienko, R. (2018). Methods and means of heat losses monitoring for heat pipelines. *International Journal "NDT Days"*, 2(1), 213-221. (ISSN 2603-4646).

43. **Zaporozhets, A.** (2019). System for Diagnosing Main Pipelines of Heat Networks Based on UAVs. *International Journal "NDT Days"*, 1(2), 69-77. (ISSN 2603-4646).

44. Babak, V.P., **Zaporozhets, A.O.**, Nazarenko, O.O., Redko, O.O. (2017) Аналіз апроксимації результатів вимірювань теплового потоку бомбового калориметра в нестационарному режимі. *ScienceRise*, 37(8), 24-32. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.108935> (ISSN 2313-8416)

45. **Zaporozhets, A.** (2019) Analysis of control system of fuel combustion in boilers with oxygen sensor. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64(4), 241-248. <https://doi.org/10.3311/PPme.12572> (**Scopus, Q2**, ISSN 1587-379X)

46. **Zaporozhets, A.** (2020). Overview of Quadrocopters for Energy and Ecological Monitoring. *Studies in Systems, Decision and Control*, 298, 15-36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_2 (**Scopus, Q4**, ISSN 2198-4190).

47. **Zaporozhets, A.**, Khaidurov, V., Tsiupii, T. (2021). Optimization Models of Industrial Furnaces and Methods for Obtaining Their Numerical Solution. *Studies in Systems, Decision and Control*, 346, 121-139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_7 (**Scopus, Q4**, ISSN 2198-4190).

48. Iatsyshyn, A., Artemchuk, V., **Zaporozhets, A.**, Popov, O., Kovach, V., Taraduda, D. (2021). Development of Teaching Methodology in the Field of Environmental Monitoring of Atmosphere. *Studies in Systems, Decision and Control*, 346, 121-139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_18 (**Scopus, Q4**, ISSN 2198-4190).

49. Пат. №121084, Україна, МПК F17D 5/02, G01K 17/00. Спосіб діагностування технічного стану магістральних трубопроводів теплових мереж / **Запорожець, А.О.**, Ковтун, С.І.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 15.11.2018; опубл. 25.03.2020. Бюл. №6.

50. **Запорожець, А.О.** (2019). Дистанційне діагностування технічного стану тепломереж на базі квадрокоптерів. *Тези XI Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, 21-22 травня 2019 р. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно на основі результатів досліджень, проведених як індивідуально, так і колективно. В дисертації не використовувались ідеї та результати, що належать співавторам наукових праць.

Роботи [10, 31, 32, 34, 38, 43, 45, 46, 50] написані здобувачем одноосібно. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належить: розроблення методів і засобів оцінювання технічного стану сенсорів і систем контролю [1, 19]; методологія створення і використання систем контролю забруднення повітря в околі об'єктів енергетики [2, 9, 20, 30]; розроблення методів визначення та прогнозування концентрації кисню у повітрі, та перспективи його використання [3, 7, 25, 29]; обґрунтування технічних рішень для створення вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря та їх експериментальні дослідження [4, 13, 17, 18, 24, 26, 28, 39, 40]; опис запропонованих математичних моделей [5, 6, 8, 16, 23, 33, 35, 47]; аналіз протоколів маршрутизації в IoT-системах [11]; обґрунтування особливостей використання безпілотних літальних апаратів для контролю енерго-екологічних характеристики об'єктів енергетики [12, 22, 37, 42, 49]; обґрунтування концепції використання інструментарію інформаційно-вимірювальних технологій в енергетичній інформатиці [14, 21]; аналіз методів виявлення аномальних режимів функціонування об'єктів контролю [15, 36]; обґрунтування технічних рішень для зменшення викидів [27, 41]; опрацювання експериментальних даних [44], постановка задач контролю забруднення повітря [48].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на: International Symposium on Sustainable Aviation (м. Київ, 2017 р.); XXXVI – XL щорічних науково-практичних конференціях молодих учених і спеціалістів ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 2018-2022 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя» (Київ, 2018 р.); IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (Львів, 2018 р.); XI-XII Міжнародних конференціях «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ, 2019, 2021 рр.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Мехатронні системи: інновації та

інжиніринг» (Київ, 2019 р.); 9-й Національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019» (Київ, 2019 р.); Всеукраїнській науково-практичній Internet-конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (Черкаси, 2021 р.); 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD) (Київ, 2021 р.).

Оцінка мови та стилю дисертації. Дисертація написана грамотно, стиль викладу матеріалів досліджень, наукових положень та висновків забезпечують легкість і доступність їх сприйняття.

Відповідність змісту дисертації паспорту спеціальності. Зміст дисертації відповідає спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин за напрямом досліджень «Прилади й засоби контролю та захисту навколишнього природного середовища».

Відповідність принципам академічної доброчесності. Дисертаційна робота містить результати власних досліджень автора. Використання ідей, наукових результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Загальний висновок. На підставі вищенаведеного вважаємо, що дисертаційна робота канд. техн. наук, ст. досл. Запорожця Артура Олександровича «Науково-практичні засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики» відповідає вимогам п. 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, що їх пред'являють до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук і паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин, є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в своїй сукупності вирішують важливу науково-прикладну проблему створення теоретичних засад, розроблення та практичного застосування засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що забезпечує локалізацію джерел забруднення повітря на базі просторово розгалужених бездротових сенсорних мереж.

Рекомендуємо дисертаційну роботу старшого наукового співробітника відділу моніторингу та діагностики об'єктів енергетики Інституту загальної енергетики НАН України канд. техн. наук, ст. досл. Запорожця Артура Олександровича на тему: «Науково-практичні засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики» для подання до спеціалізованої вченої ради Д 26.223.01 для попереднього розгляду та захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

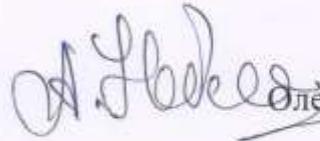
Рецензенти:

Провід. наук. співроб.
ІЗЕ НАН України,
чл.-кор. НАН України,
д-р техн. наук, професор



Наталія ФІАЛКО

Провід. наук. співроб.
ІЗЕ НАН України,
чл.-кор. НАН України,
д-р техн. наук, ст. наук. співр.



Олександр НОВОСЕЛЬЦЕВ

Провід. наук. співроб.
ІЗЕ НАН України
д-р техн. наук, ст. наук. співр.



Леонід ЖУКОВ

Підписи рецензентів завіряю:
т.в.о. вченого секретаря ІЗЕ НАН України,
д-р техн. наук, ст. досл.



Світлана КОВТУН