

УДК 519.6:504.064

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.4>

Олександр ПОПОВ

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, виконувач обов'язків директора, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики

Національної академії наук України,

професор кафедри комп'ютерних інформаційних систем і технологій, ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія Управління персоналом», sasha.popov1982@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5065-3822

Андрій ЯЦИШИН

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, виконувач обов'язків завідувача відділу, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики

Національної академії наук України,

провідний науковий співробітник, Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова Національної академії наук України, iatsyshyn.andriy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5508-7017

Анастасія ЛАГОЙКО

провідний інженер, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики

Національної академії наук України, lagoyko992@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6366-4419

Володимир КУЦЕНКО

молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, kuts.vo@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0577-2056

Олександр КОВАЛЕНКО

молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України,

аспірант, ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія Управління персоналом», whitewavex@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4798-7722

Євген КРАСНОВ

молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, yevhen.krasnov@gmail.com

ORCID: 0009-0009-7971-0761

СУЧАСНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕФЕКТУ «ЗМИВУ» ПРИ ВИМІРЮВАННІ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

Анотація. Рівень забруднення атмосферного повітря формується під впливом багатьох факторів, зокрема викидів від об'єктів енергетики, транспорту, промисловості сільськогосподарства, а також процесів утилізації та очищення стоків. Він також залежить від метеорологічних умов, швидкості розсіювання забруднюючих речовин та їх взаємодії з навколишнім середовищем (фізико-хімічна трансформація, вимивання опадами, поглинання підстилаючою поверхнею), і географічних особливостей місцевості (рельєф, наявність забудови, висота та щільність рослинності). У статті наведено джерела викидів таких забруднювачів повітря, як тверді частинки, чадний газ і діоксид вуглецю, оксиди азоту, аміак, летючі органічні сполуки, озон, діоксид сірки, сірководень, випромінювання, запахи), зазначено загальні методи їх вимірювання. Описано особливості функціонування наземних стаціонарних станцій моніторингу якості повітря. Показано низьку ефективність даних систем для оперативного реагування на швидкоплинні надзвичайні ситуації з хімічним та радіаційним фактором забруднення. Обґрунтовано, що для оперативної оцінки обстановки та отримання необхідних даних під час виникнення таких ситуацій ефективним підходом є застосування систем моніторингу, які базуються на мобільних платформах, а саме БПЛА. Відзначено, що перевагами цих засобів є можливість оперативного потрапляння на місце надзвичайної ситуації в складних умовах (складний рельєф місцевості, наявність важкопрохідної рослинності, руйнація або аварійно-небезпечний стан об'єкту, велика пожежа або вибухи на території об'єкту, бойові дії, важкі метеумови тощо) та швидке отримання необхідних даних для прийняття вчасних ефективних управлінських рішень службами реагування. Описано ефект «змиву», який виникає під БПЛА в результаті швидкого обертання його роторів, що спричиняє порушення розподілу повітря навколо дрона і зменшення концентрації досліджуваних газів в місці розташування мультисенсорної сис-

теми. Здійснено аналіз сучасних передових технічних рішень науковців з різних країн світу щодо розміщення датчиків на борту БПЛА для зменшення впливу ефекту «змиву» на точність вимірювання відповідних концентрацій.

Ключові слова: моніторинг атмосферного повітря, БПЛА, ефект «змиву», технічні рішення.

Oleksandr POPOV, Andrii IATSYSHYN, Anastasiia LAHOIKO, Volodymyr KUTSENKO, Oleksandr KOVALENKO, Yevhen KRASNOV. MODERN TECHNICAL SOLUTIONS TO REDUCE THE «DOWN-WASH» EFFECT WHEN MEASURING POLLUTANT CONCENTRATIONS USING UAVS

Abstract. The level of air pollution is formed under the influence of many factors, including emissions from energy, transport, and agricultural facilities, as well as waste disposal and treatment processes. It also depends on meteorological conditions, the rate of dispersion of pollutants and their interaction with the environment (physical and chemical transformation, leaching by precipitation, absorption by the underlying surface), and geographical features of the area (relief, presence of buildings, height and density of vegetation). The article describes the sources of emissions of such air pollutants as particulate matter, carbon monoxide and carbon dioxide, nitrogen oxides, ammonia, volatile organic compounds, ozone, sulphur dioxide, hydrogen sulphide, radiation, and odours, and outlines the general methods of their measurement. The peculiarities of the functioning of ground-based stationary air quality monitoring stations are described. The article shows the low efficiency of these systems for rapid response to rapidly evolving emergencies with chemical and radiation pollution. It is substantiated that an effective approach to the rapid assessment of the situation and obtaining the necessary data in the event of such situations is to use monitoring systems based on mobile platforms, namely UAVs. It is noted that the advantages of these tools are the ability to quickly get to the scene of an emergency in difficult conditions (difficult terrain, the presence of hard-to-pass vegetation, destruction or emergency condition of an object, a large fire or explosions on the territory of an object, hostilities, severe weather conditions, etc.) and to quickly obtain the necessary data for making timely and effective management decisions by response services. The article describes the «down-wash» effect that occurs under the UAV as a result of the rapid rotation of its rotors, which causes a disturbance in the air distribution around the drone and a decrease in the concentration of the gases under study at the location of the multisensor system. The article analyses the modern advanced technical solutions of scientists from around the world regarding the placement of sensors on board the UAV to reduce the impact of the «down-wash» effect on the accuracy of measuring the relevant concentrations.

Key words: atmospheric air monitoring, UAVs, down-wash effect, technical solutions.

Актуальність проблеми

На сьогоднішній день основними антропогенними причинами надходження забруднюючих речовин в атмосферне повітря є викиди підприємств, діяльність яких пов'язана з видобутком природних ресурсів (урану, вугілля, нафти, природного газу тощо), об'єктів промисловості (енергетика, металургія, сільське господарство, харчова, хімічна, фармацевтична), транспорту (вихлопні гази, кіптява, пил), від спалювання відходів тощо. Виверження вулканів, гейзери, лісові та торф'яні пожежі, піщані бурі, випаровування боліт є потужними природними джерелами забруднення атмосфери різноманітними газами, твердими частинками та аерозолями [1]. В таблиці 1 представлено основні забруднювачі повітря, їх джерела та загальні методи вимірювання.

Таблиця 1

Забруднювачі повітря, їх джерела та загальні методи вимірювання

Забруднювач	Опис	Джерела	Еталонний метод вимірювання
Тверді частинки (PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁)	Дрібний пил, який складається з найдрібніших частинок, які розділені на групи в залежності від фракцій: PM ₁₀ (<10 мкм), PM _{2,5} (<2,5 мкм), PM ₁ (<1,0 мкм)	Антропогенні: утворюється при спалюванні палива в різних секторах, включаючи транспорт, енергетику, побут, промисловість та сільське господарство. Природні: пилові бурі, лісові та торф'яні пожежі, виверження вулканів.	Гравіметричні методи, фотодетектори
Чадний газ (CO) і діоксид вуглецю (CO ₂)	Гази, що утворюються при спалюванні палива	Антропогенні: двигуни транспортних засобів, спалювання відходів. Природні: лісові та торф'яні пожежі, виверження вулканів, рослинність та інша біомаса, що розкладаються.	Недисперсійні інфрачервоні методи
Оксиди азоту (NO _x)	Група реакційноздатних газів, включаючи NO і NO ₂ .	Антропогенні: двигуни транспортних засобів, спалювання деревини та промислова діяльність (виробництво механічної енергії та електроенергії). Природні: біологічні процеси в ґрунті, блискавка	Хемілюмінесценція

Аміак (NH ₃)	Безбарвний газ з різким запахом	Антропогенні: сільськогосподарська діяльність	Хемілюмінесценція
Летючі органічні сполуки	Хімічні речовини, що містять вуглець, які випаровуються при кімнатній температурі	Антропогенні: транспорт, майже всі галузі промисловості, спалювання деревини в житлових приміщеннях, споживчі товари (розчинники, фарби, засоби для чищення), відходи та стічні води. Природні: дихання рослин і тварин, розкладання органічних речовин.	Газова хроматографія з фотоіонізаційними та фотометричними детекторами
Озон (O ₃)	Газ, що складається з трьох атомів кисню	Антропогенні: реакції між NO _x і леткими органічними сполуками (каталізуються сонячним світлом)	УФ фотометрія.
Діоксид сірки (SO ₂)	Безбарвний газ з різким запахом	Антропогенні: морські судна, нафтопереробка, дизельні двигуни. Природні: виверження вулканів, розкладання органічної речовини, морські бризки.	УФ-флуоресценція
Сірководень (H ₂ S).	Безбарвний газ із характерним запахом тухлих яєць	Антропогенні: видобуток і переробка нафти та природного газу, розкладання відходів людини та тварин, очисні споруди та звалища. Природні: вулкани, гарячі джерела та підводні термальні джерела, болота.	Газова хроматографія з фотометричними детекторами
Іонізуюче випромінювання	Випромінювання частинок високої енергії, які викликають іонізацію	Антропогенні: ядерні аварії, ядерні вибухи, видобуток урану. Природні: радіоактивний розпад радіонуклідів.	Лічильник Гейгера-Мюллера та сцинтиляційні лічильники
Інші сполуки, що створюють запах	Леткі сполуки, запах яких люди і тварини сприймають за допомогою нюху	Антропогенні: сільське господарство та тваринництво, промислова діяльність (харчова, хімічна, фармацевтична), відходи та очищення стічних вод	Динамічна ольфактометрія

У багатьох країнах рівень забруднення повітря з часом вимірюється за допомогою наземних стаціонарних станцій моніторингу якості повітря. Моніторинг у галузі охорони атмосферного повітря проводиться з метою отримання, збирання, оброблення, збереження та аналізу інформації про викиди забруднюючих речовин та рівень забруднення атмосферного повітря, оцінки та прогнозування його змін і ступеня небезпечності та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень у галузі охорони атмосферного повітря [2]. Проте такі системи мають ряд недоліків, а саме: моніторинг здійснюється в заданій точці вимірювання, що представляє джерело викидів або фон для даного регіону, тому таке вимірювання не має просторових характеристик, наприклад, у рамках аналізу мінливості концентрації разом із висотою; у разі виникнення надзвичайної ситуації (НС) неможливо потрапити на її місце під час складних умов (складний рельєф місцевості; наявність важкопрохідної рослинності; руйнація, аварійно-небезпечний стан або замінування об'єкту; велика пожежа або вибухи на території об'єкту; важкі погодні умови тощо); необхідність фізичної участі персоналу у відборі проб, що створює суттєвий ризик для його життя та здоров'я в умовах значного рівня забруднення на досліджуваній території; часозатратна логістика; людський фактор поведінки при НС. Також низький рівень технічного забезпечення систем моніторингу не дає можливості отримувати інформацію щодо розвитку таких НС в режимі реального часу з можливістю візуального спостереження. Такий стан систем моніторингу не дає можливості відповідним службам реагування отримувати максимально швидко оперативну повну інформацію щодо виникнення та розвитку НС (різновид НС (пожежа, вибух, витікання небезпечних речовин, розрив трубопроводу, тощо), розподіл в просторі та часі рівня забруднення, його склад, швидкість розповсюдження, місце локалізації НС, прогнозовані масштаби ураження, ризики для життя та здоров'я персоналу і населення та ін.), що є абсолютно неприйнятним з точки зору забезпечення національної безпеки будь якої країни [3].

Ці недоліки можна вирішити застосувавши системи моніторингу, які базуються на мобільних платформах, а саме безпілотні літальні апарати (БПЛА). Сучасні наукові дослідження показують, що завдяки стрімкому розвитку сектору виробництва дронів, а також у сфері конструювання портативних детекторів зростає застосування БПЛА для моніторингу забруднення атмосфери. Проте через обмежену вантажопідйомність малих БПЛА та обмежений час їх польоту потрібні легкі та енергоефективні системи

для здійснення моніторингу навколишнього середовища за допомогою безпілотників. На сьогоднішній день для цієї мети успішно використовують недорогі одиничні газові датчики, мультисенсорні системи, електронні носи, високоточні оптичні аналізатори, детектори радіації та оптичні лічильники частинок для концентрації твердих часток [1]. Проте при використанні безпілотників з гвинтокрилом виникає явище «змиву» (downwash), що спричиняє порушення розподілу повітря навколо дрона, і, таким чином, впливає на продуктивність бортових датчиків.

Метою статті є визначення підходів та сучасних технічних рішень щодо розміщення аналітичних засобів на корпусі БПЛА для зменшення/усунення ефекту «змиву».

Виклад основного матеріалу

Основні групи БПЛА

Можна виділити дві основні групи БПЛА: безпілотні літальні апарати з нерухомим крилом (НК) і безпілотники з гвинтокрилом (БГ). Залежно від кількості роторів БГ можна далі розділити на однороторні апарати, трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери та октокоптери [4]. Однак для моніторингу забруднення атмосфери, як правило, кращими є невеликі транспортні засоби з чотирма або шістьма роторами [5]. Цікавим рішенням є поєднання принципу побудови НК та БГ. Гібридний підхід поєднує в собі переваги обох систем, наприклад вертикальний зліт і посадка з високошвидкісним польотом, характерним для НК та БГ апаратів [6, 7].

Безпілотники НК можуть літати на високих швидкостях і, отже, охоплювати великі території протягом одного польоту. Основним обмеженням цих транспортних засобів є низька вантажопідйомність. Їм також потрібна система запуску або злітно-посадкова смуга для зльоту та посадки. Оскільки вони рухаються відносно швидко, просторова роздільна здатність досягнутих вимірювань зазвичай низька [5]. Однак цей фактор також залежить від часу відгуку бортового аналітичного обладнання. З тієї ж причини їх не можна використовувати для додатків, які вимагають польотів на повільній швидкості, таких як дослідження міських і промислових районів.

Безпілотники БГ позбавлені цих обмежень, тому що вони працюють на нижчих швидкостях і ними легко маневрувати, частково завдяки їхнім можливостям вертикального зльоту і посадки [8]. Однак через низьку швидкість і дальність польоту дослідження великих територій зазвичай вимагають декількох польотів, що займає багато часу та потребує більших фінансових витрат. Час польоту типового БПЛА з ротаційним крилом становить лише близько 30 хвилин і може бути зменшений при повному завантаженні [9].

Ефект «змиву» та шляхи його усунення

Найбільшим недоліком БГ є так званий ефект «змиву» (downwash), тобто сильний перпендикулярний повітряний потік, створюваний роторами. Це явище може спричинити порушення розподілу повітря навколо дрона, і, таким чином, вплинути на продуктивність бортових датчиків [10, 11]. Цей ефект є незначним на відстані декількох десятків сантиметрів над дроном, проте під БПЛА «змив» може поширюватися на декілька метрів [12, 13]. Це локальне змішування повітря створює негативний вплив на вимірювання датчиків БПЛА через сильні просторові градієнти параметрів атмосферного повітря. Це, в свою чергу, створює суттєві труднощі щодо вибору правильного розміщення вимірювальних пристроїв (датчиків) на борту БПЛА.

Явище «змиву» не впливає на достовірність та точність вимірювань високоточним оптичним аналізатором, проте інші датчики можуть фіксувати занижені рівні концентрації досліджуваних газів [14]. Таким чином, оптичні аналізатори можна прикріпити безпосередньо під корпусом дрона [15] (рис. 1 а, б), але для інших датчиків необхідно застосовувати більш складні підходи, щоб отримати вимірювання концентрації газу з високою точністю.

«Змив» найслабший у горизонтальних напрямках. Тому багато дослідницьких груп розміщують свої вимірювальні системи на штанзі, яка дозволяє відбирати зразки незбуреного повітря (рис. 1 в). Однак, такий підхід, дестабілізує центр тяжіння дрона, і, таким чином, робить його аеродинамічно неефективним [16].

Іншим рішенням є використання насосних систем із входом, розташованим далеко від платформи (рис. 1 г, д). Конструкції з горизонтальною або вертикальною пробовідбірною трубкою застосовували багато дослідників [17]. Цей підхід також широко використовується в комерційних системах, наприклад, AirDrone, SnifferDrone, Scentroid DR1000, Aeromon BH-12. Основним недоліком цього методу є те, що застосування довгих трубок може призвести до збільшення часу відгуку через адсорбцію певних газів на внутрішніх стінках трубок.

Для підходів, які не вимагають вимірювання концентрації газу з високою точністю, корисне навантаження може бути встановлено безпосередньо на корпусі дрона. З цієї метою невеликі недорогі датчики часто розміщують перед роторами [18, 19] або прикріплюють до верхньої частини БПЛА [20] (рис. 1 е).

В роботі [21] дослідники для визначення хімічних речовин у повітрі провели тестування детектора ChemDet на БПЛА різних розмірів і, відповідно, різного корисного навантаження. Для тестування «змиву» використовувався БПЛА DJI Inspire 2 (Shenzhen, China). Модель БПЛА DJI M600 з розробленим корисним навантаженням для моніторингу стану атмосферного повітря показано на рис. 2 [22].

Автори [21] відзначають, що проблема «змиву» загальновідома і вона ретельно досліджувалася під час вивчення комбінації БПЛА та датчика газу. Оберткові гвинти створюють сильний турбулентний повітряний потік під літальним апаратом, який може розріджувати або навіть виштовхувати повітряну масу, тим самим видаляючи досліджуваний газ. Це суттєво впливає на показання датчика через зміну концентрації газу під БПЛА [23].

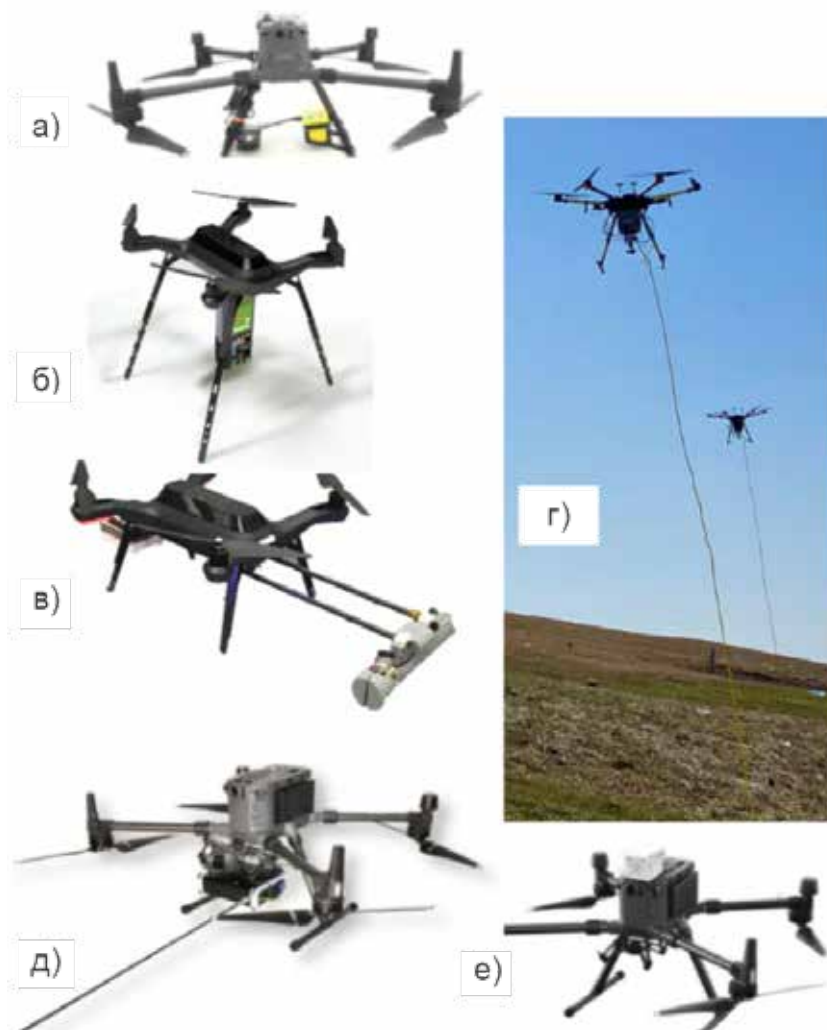


Рис. 1. Приклади встановлення корисного навантаження на дрони [15, 16]:

- а) SkyHub із газоаналізатором, розміщеним безпосередньо в нижній частині корпусу дрона;**
- б) високоточний оптичний аналізатор sTDLAS Pergam Methane mini-G (SA3C50A), встановлений безпосередньо на дні корпусу дрона;**
- в) саморобна система з установкою корисного навантаження на штанзі;**
- г) SnifferDrone з довгою трубкою для відбору проб;**
- д) AirDrone з горизонтально розташованою входною трубкою;**
- е) Sniffer4D з корисним навантаженням, розміщеним безпосередньо на верхній частині корпусу дрона**

В роботі [24] для зменшення впливу роторів дронів на вимірювання концентрації газів у повітрі було використано повітряний насос CM-15-6 (Enomoto Micro Pump Mfg. Co., Ltd, Токіо, Японія). Подібно до інших датчиків і приладів повітряний насос був встановлений всередині мультисенсорної системи. Повітрязабірник був встановлений на відстані 200 мм від роторів на верхній пластині дрона. Швидкість потоку всмоктуваного повітря контролювалася обертанням двигуна повітряного насоса за допомогою функції широтно-імпульсної модуляції.

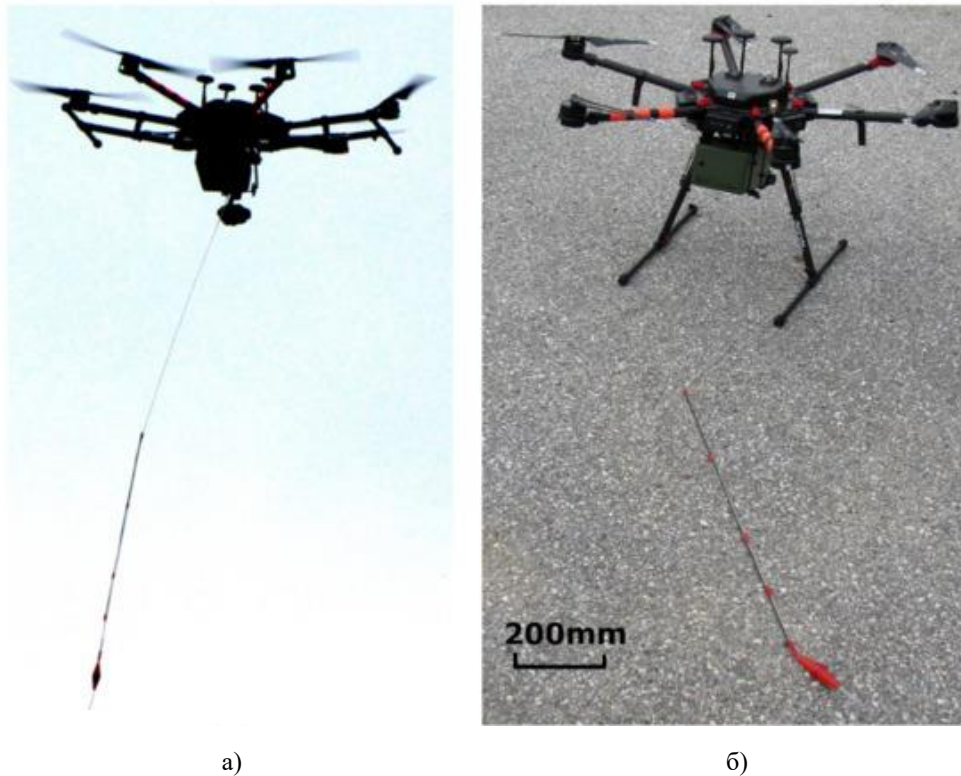


Рис. 2. БПЛА з ChemDet і системою труб (а) під час польоту та (б) перед зльотом

В роботах [25, 26] також досліджувався ефект «змиву» та здійснювалось моделювання повітряного потоку навколо роторів. Для експерименту авторами був використаний смітцевий бак як джерело викидів аміаку NH_3 . На бак був встановлений датчик даного газу ChemDet (рис. 3) і здійснювалось вимірювання його концентрації в умовах зависання БПЛА на різних відстанях від баку. Результати показали, що при відстанях більше 2-ох метрів обертання роторів БПЛА не створюють значних збурень повітря в місці розміщення датчика, і чим більша відстань, тим меншим був вплив. А при наближенні БПЛА до смітника створювався значний потік турбулентного повітря біля датчику аміаку, що зменшувало концентрацію досліджуваного газу в 2–5 разів. Тому, для усунення ефекту «змиву» вчені оснастили мультисенсорний БПЛА довгою силіконовою гумовою трубкою довжиною 2 м з вагою на кінці (рис. 4).

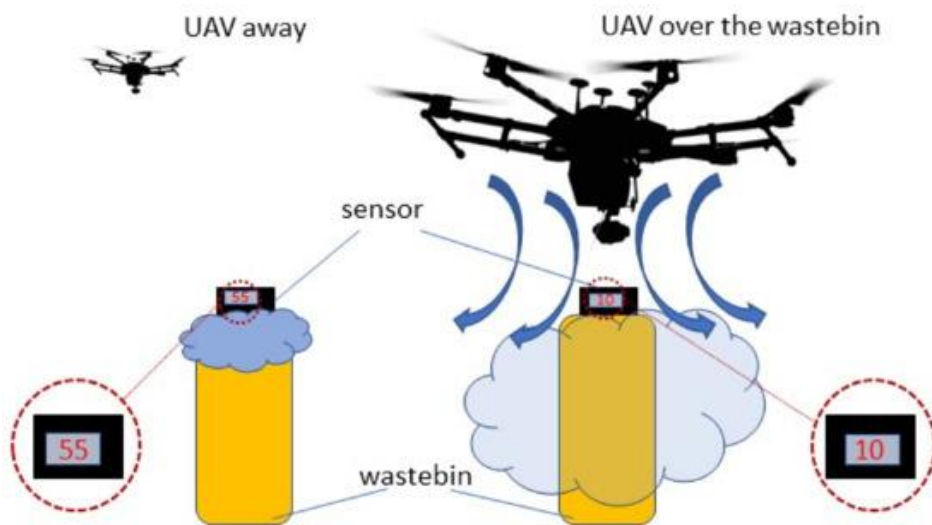


Рис. 3. Схематичне представлення експерименту з використанням БПЛА та датчика аміаку ChemDet, розміщеного на смітцевому баку, для демонстрації виникнення ефекту «змиву»

Також вченими вирішувалась проблема забезпечення надійного кріплення даної трубки до корпусу БПЛА. Було визначено, що оптимальним рішенням є використання магнітного фітингу. Це кріплення було достатньо міцним, щоб не втратити трубку під час регулярних операцій, але достатньо слабким, щоб БПЛА міг розірвати з'єднання різким рухом у разі заплутування трубки.

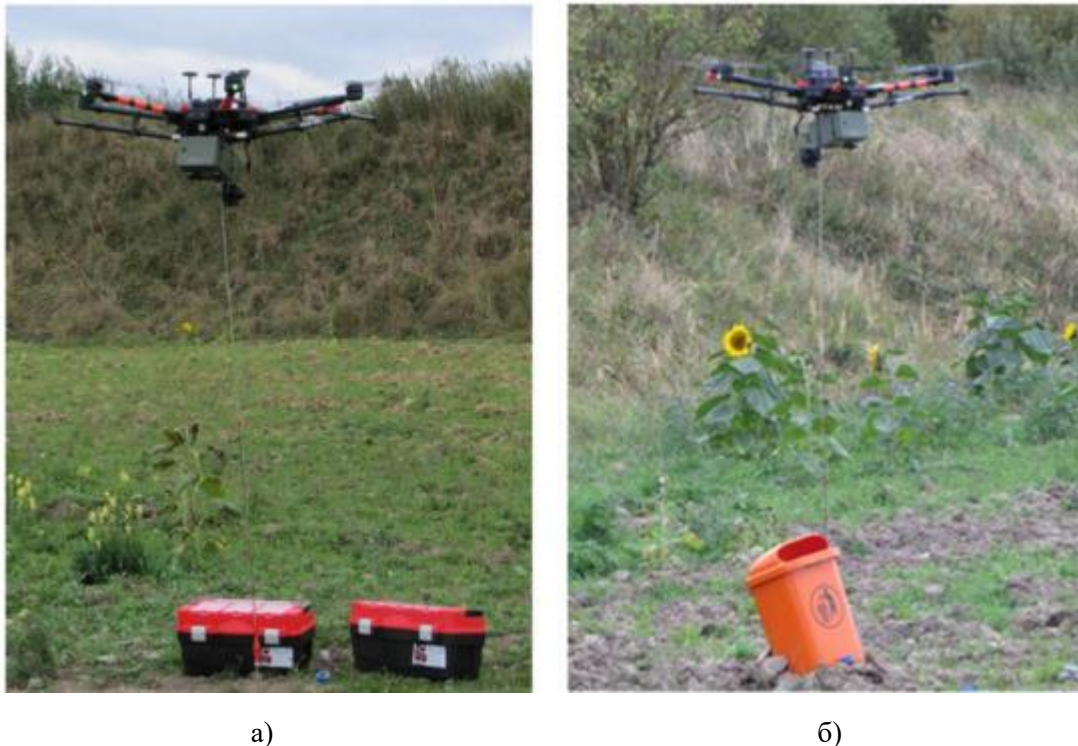


Рис. 4. Використання БПЛА з трубкою для усунення ефекту «змиву» при вимірюванні концентрації забруднюючих речовин від: а) закритих ящиків, б) відра для сміття

Знімок екрана з панелі оператора, що вказує на виявлення аміаку при рівнях концентрації, які були набагато вищими за попередньо визначений поріг концентрації. Під час вимірювання датчик аміаку досяг насичення, яке видно на графіку для NH_3 . Також здійснювалось вимірювання концентрацій і інших речовин в ppm. Червоний індикатор показує перевищення порогової концентрації для аміаку (рис. 5).

Висновки

Існуючі наземні стаціонарні станції моніторингу якості повітря є малоефективними (не дозволяють оперативно отримувати необхідну корисну інформацію про забруднення території) в складних умовах при надзвичайній ситуації з хімічним або радіаційним фактором ураження. Така проблема створює суттєві ризики для здоров'я населення та персоналу підприємств і організацій, що опинилися в зоні потенційного ураження.

Цю проблему можна вирішити застосувавши системи моніторингу, які базуються на мобільних платформах, а саме БПЛА. Їх можливості дозволяють потрапити на місце надзвичайної ситуації в умовах складного рельєфу місцевості, наявності важкопрохідної рослинності, руйнації або аварійно-небезпечного стану об'єкту, великої пожежі або вибухів на території об'єкту, важкої погодної обстановки. При цьому значно зменшується час отримання необхідних даних для прийняття вчасних ефективних управлінських рішень службами реагування.

Наукові дослідження багатьох вчених різних країн світу щодо використання БПЛА для вимірювання концентрацій забруднюючих речовин показують наявність ефекту «змиву», що спричиняє порушення розподілу повітря навколо дрона, і, таким чином, впливає на продуктивність бортових датчиків. Даний ефект виникає саме у нижній частині вимірювального комплексу на базі БПЛА через швидке обертання його роторів (над корпусом дрона даний ефект є незначним). Через це створюється турбулентний потік, що виштовхує повітряну масу під БПЛА, тим самим суттєво зменшуючи концентрації досліджуваних газів в місці розташування датчиків.

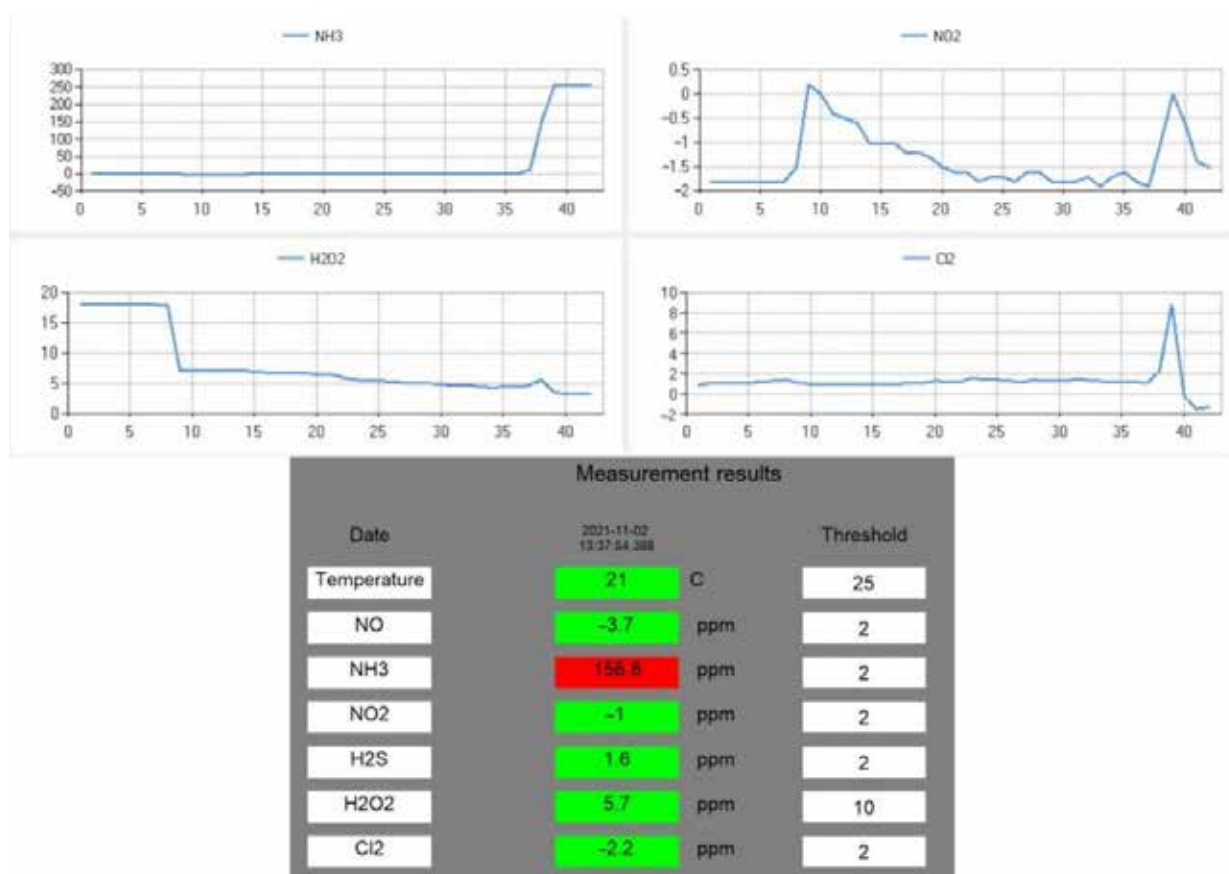


Рис. 5. Приклад показань датчиків на борту БПЛА при вимірюванні концентрацій забруднюючих речовин

На сьогоднішній день для зменшення ефекту «змиву» існують різні технічні рішення розміщення вимірювальних систем на БПЛА, що дозволяє збільшувати точність вимірювання концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Найбільш ефективним є використання силіконової гумової трубки довжиною 2 м та вагою на кінці, що дозволяє здійснювати відбір повітря на відстані для усунення впливу даного ефекту.

Однак розміщення додаткового обладнання на корпусі БПЛА зменшує аеродинамічні характеристики його польоту (маневреність, висота, швидкість, дальність тощо), а тому вчені продовжують дослідження в цій проблематиці для отримання оптимального рішення.

Список використаних джерел:

1. Jońca J., Pawluk M., Bezyk Y., Arsen A., Sówka I. Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution – A Comprehensive Review. Sustainability. 2022. Vol. 14(18). 11516. URL: <https://doi.org/10.3390/su141811516>
2. ЗАКОН УКРАЇНИ «Про охорону атмосферного повітря» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
3. Oleniacz R., Gorzelnik T. Assessment of the Variability of Air Pollutant Concentrations at Industrial, Traffic and Urban Background Stations in Krakow (Poland) Using Statistical Methods. Sustainability. 2021. Vol. 13. 5623. URL: <https://doi.org/10.3390/su13105623>
4. Chamola V., Kotes P., Agarwal A., Naren Gupta N., Guizani M. A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. Ad Hoc Netw. 2021. Vol. 111. 102324. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>
5. Boon M. A., Drijfhout A. P., Tesfamichael, S. Comparison of a fixed-wing and multi-rotor uav for environmental mapping applications: A case study. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2017. Vol. XLII-2-W6. P. 47–54. URL: <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-47-2017>
6. Ducard G. J. J., Allenspach M. Review of designs and flight control techniques of hybrid and convertible VTOL UAVs. Aerosp. Sci. Technol. 2021. Vol. 118. 107035. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107035>
7. Zhou Y., Zhao H., Liu Y. An evaluative review of the VTOL technologies for unmanned and manned aerial vehicles. Comput. Commun. 2020. Vol. 149. P. 356–369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.016>

8. Lee C., Kim S., Chu B. A Survey: Flight Mechanism and Mechanical Structure of the UAV. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2021. Vol. 22. P. 719–743. <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00489-y>
9. Ito S., Akaiwa K., Funabashi Y., Nishikawa H., Kong X., Taniguchi I., Tomiyama H. Load and Wind Aware Routing of Delivery Drones. *Drones.* 2022. Vol. 6. 50. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6020050>
10. Kaliszewski M., Włodarski M., Młyńczak J., Jankiewicz B., Auer L., Bartosewicz B., Liszewska M., Budner B., Szala M., Schneider B., et al. The Multi-Gas Sensor for Remote UAV and UGV Missions–Development and Tests. *Sensors* 2021. Vol. 21. 7608. URL: <https://doi.org/10.3390/s21227608>
11. Madokoro H., Kiguchi O., Nagayoshi T., Chiba T., Inoue M., Chiyonobu S., Nix S., Woo H., Sato K. Development of Drone-Mounted Multiple Sensing System with Advanced Mobility for In Situ Atmospheric Measurement: A Case Study Focusing on PM2.5 Local Distribution. *Sensors.* 2021. Vol. 21. 4881. URL: <https://doi.org/10.3390/s21144881>
12. Villa T. F., Salimi F., Morton K., Morawska L., Gonzalez F. Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. *Sensors.* 2016. 16. 2202. URL: <https://doi.org/10.3390/s16122202>
13. Burgués J., Esclapez M.D., Doñate S., Marco S. RHINOS: A lightweight portable electronic nose for real-time odor quantification in wastewater treatment plants. *iScience.* 2021. 24. 103371. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103371>
14. Hutchinson M., Liu C., Chen W.H. Source term estimation of a hazardous airborne release using an unmanned aerial vehicle. *J. Field Robot.* 2019. Vol. 36. P. 797–817. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.21844>
15. Oberle F. K. J., Gibbs A. E., Richmond B. M., Erikson L. H., Waldrop M. P., Swarzenski P. W. Towards determining spatial methane distribution on Arctic permafrost bluffs with an unmanned aerial system. *SN Appl. Sci.* 2019. Vol. 1. 236. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0242-9>
16. Smith B. J., John G., Christensen L. E., Chen Y. Fugitive methane leak detection using sUAS and miniature laser spectrometer payload: System, application and groundtruthing tests. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, FL, USA, 13–16 June 2017*; pp. 369–374. URL: <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991403>
17. Cichowicz R., Dobrzański M. Modeling Pollutant Emissions: Influence of Two Heat and Power Plants on Urban Air Quality. *Energies.* 2021. Vol. 14. 5218. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en14175218>
18. Koval A., Irigoyen E., Koval T. A. R. Drone as a platform for measurements. In *Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 18–20 April 2017*; pp. 424–427. URL: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2017.7939812>
19. Takei Y., Kanazawa Y., Hirasawa K., Nanto H. Development of 3D gas source localization using multi-copter with gas sensor array. In *Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN), Fukuoka, Japan, 26–29 May 2019*; pp. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/ISOEN.2019.8823396>
20. Burgués J., Hernández V., Lilienthal A. J., Marco S. Smelling Nano Aerial Vehicle for Gas Source Localization and Mapping. *Sensors.* 2019. Vol. 19. 478. URL: <https://doi.org/10.3390/s19030478>
21. Kaliszewski M., Włodarski M., Młyńczak J., Jankiewicz B., Auer L., Bartosewicz B., Liszewska M., Budner B., Szala M., Schneider B., Povoden G., Kopczyński K. The Multi-Gas Sensor for Remote UAV and UGV Missions–Development and Tests. *Sensors.* 2021. Vol. 21. 7608. URL: <https://doi.org/10.3390/s21227608>
22. DJI. M600 Specifications. URL: <https://www.dji.com/uk/matrice600-pro/info#specs>
23. Burgués J., Marco S. Environmental chemical sensing using small drones: A review. *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 748. 141172. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141172>
24. Madokoro H., Kiguchi O., Nagayoshi T., Chiba T., Inoue M., Chiyonobu S., Nix S., Woo H., Sato K. Development of Drone-Mounted Multiple Sensing System with Advanced Mobility for In Situ Atmospheric Measurement: A Case Study Focusing on PM2.5 Local Distribution. *Sensors.* 2021. Vol. 21. 4881. URL: <https://doi.org/10.3390/s21144881>
25. Yang F., Xue X., Cai C., Sun Z., Zhou Q. Numerical Simulation and Analysis on Spray Drift Movement of Multicopter Plant Protection Unmanned Aerial Vehicle. *Energies.* 2018. Vol. 11. 2399. URL: <https://doi.org/10.3390/en11092399>
26. Wu Y., Qi L., Zhang H., Musiu E.M., Yang Z., Wang P. Design of UAV Downwash Airflow Field Detection System Based on Strain Effect Principle. *Sensors* 2019. Vol. 19. 2630. URL: <https://doi.org/10.3390/s19112630>