

УДК 531.38: 504.3: 621.039

О.П. Мариношенко, О.В. Прохорчук

*Національний технічний ун-т України "КПІ", Київ
E-mail: a-marin@ukr.net*

Використання безпілотного літального апарату для моніторингу джерел викиду шкідливих речовин

В работе осуществляется попытка определения характера распространения полидисперсного аэрозольного облака, образованного при выбросе твердых рецептур на малых и средних высотах, на основе верификации математической модели ее движения и осаднения. Дано краткое описание условий и методики проведения полевых экспериментов с использованием современного средства экологического мониторинга - беспилотного летательного аппарата. Приведена математическая модель, ее частные решения а также представлены результаты математического моделирования для задачи о распространении радиоактивных аэрозолей в зоне выброса.

Вступ. Однією з найважливіших практичних задач забезпечення безпеки населення та об'єктів народного господарства є питання забруднення повітря промисловими підприємствами, при цьому найбільш важливою та актуальною для всього людства є проблема розповсюдження в повітрі радіоактивних речовин.

В свою чергу для опису процесу переносу радіоактивних дрібнодисперсних аерозолів потрібно знати кинематику повітряних течій [1]. Зокрема, для розрахунку розповсюдження аерозолів в атмосфері необхідні дані про вертикальний розподіл швидкості вітру при різних

метеорологічних умовах [2]. Таким чином, навіть при великій кількості досліджень у цій області, все ще залишається відкритим питання досить простого і практично прийняттого для проведення експрес-аналізу аналітичного опису процесу поширення радіоактивних аерозолів, що дозволяє визначати концентрацію в точках віддалених від джерела викиду не тільки по поверхні, але і по висоті.

Постановка задачі. У даній роботі поставлена задача провести вивід математичної моделі, яка описує процес поширення радіоактивних аерозолів. На підставі отриманої моделі визначити вирази, які дозволяють дистанційно оцінити концентрацію радіоактивних аерозолів поблизу і безпосередньо в області викиду. Оцінити чутливість методу визначення об'ємної активності аерозолів.

Основні положення та системи відліку. В даному дослідженні будемо розглядати точкове джерело викиду шкідливих речовин, що знаходиться на деякій висоті.

Вводимо в розгляд нерухому декартову прямокутну систему координат $(OXYZ)$, в якій вісь OZ спрямована вгору (по напрямку місцевої вертикалі), вісь OX — на схід, а вісь OY — на північ, початок системи координат т. O відповідає місцезнаходженню джерела викиду на площині XOY . Область дослідження визначається у вигляді паралелепіпеда з нерівною нижньою межею, що відображає неоднорідність рельєфу підстильної поверхні. Одночасно з системою координат $OXYZ$ вводимо "рухому" систему координат $oxyz$, початок якої співпадає з точкою O , вісь ox спрямована за напрямком вітру, вісь oz спрямована вгору (по напрямку місцевої вертикалі), вісь oy направлена таким чином, щоб система координат була правосторонньою.

$$0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, \delta \leq z \leq z_m,$$

де L_x, L_y — розміри області по горизонталі, функція $z = \delta(x, y)$ задає рельєф місцевості (шороховатість), z_m — положення верхньої межі розглянутої області.

Перенесення забруднюючих домішок в атмосфері здійснюється вітровими потоками повітря з урахуванням їх дрібномасштабних флуктуацій. Осереднений потік має адвективну і конвективну складові, а осереднення флуктуаційного руху можна інтерпретувати як дифузію на фоні пов'язаного з ним основного усередненого руху.

Сформулюємо задачу переносу аерозольних субстанцій забруднення в атмосфері в загальному вигляді.

Нехай $C(x, y, z, t)$ — концентрація забруднюючої атмосфери субстанції, що рухається разом з потоком повітря в атмосфері, $\vec{U} = u\vec{i} + \nu\vec{j} + w\vec{k}$ — вектор швидкості частин повітря як функція координат x, y, z і часу t ; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — одиничні орти в напрямку осей системи координат $OXYZ$ відповідно; u, ν, w — проєкції вектора швидкості $\vec{U}(x, y, z, t)$ на осі системи координат.

Моделі розповсюдження в атмосфері шкідливих домішок.

Процес переносу забруднюючих домішок разом з повітряним атмосферним потоком можна описати у вигляді рівняння, що представляє собою рівність нулю повної похідної від концентрації $C(x, y, z, t)$ домішки [1].

$$\frac{dC(x, y, z, t)}{dt} = 0,$$

враховуючи, що $\frac{\partial x}{\partial t} = u$, $\frac{\partial y}{\partial t} = \nu$, $\frac{\partial z}{\partial t} = w$ матимемо:

$$\frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial t} + u \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} + \nu \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial y} + w \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Оскільки для нижніх шарів атмосфери добре виконується закон збереження маси, що визначається рівнянням неперервності отримаємо:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \nu}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad \text{div}(\vec{U}) = 0.$$

Тобто:

$$\frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial t} + \text{div}(\vec{U}C(x, y, z, t)) = 0. \quad (2)$$

Рівняння (2) можна узагальнити, якщо врахувати, що частина домішки може вступати в реакцію з зовнішнім середовищем або розпадатися з постійною часу $\tau = \frac{1}{\alpha}$ (для випадку радіоактивних аерозолів), а також врахувати джерело забруднення яке описується функцією $f(x, y, z, t)$:

$$\frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial t} + \text{div}(\vec{U}C(x, y, z, t)) + \alpha C(x, y, z, t) = f(x, y, z, t). \quad (3)$$

Точний розв'язок рівняння (3) можливий в тому випадку, коли відомі значення функції $\vec{U} = u\vec{i} + \nu\vec{j} + w\vec{k}$ в просторі і в усі моменти часу. Якщо ж інформації про компоненти вектора швидкості недостатньо,

то в цьому випадку доцільно користуватися різними наближеннями та припущеннями [2].

Для опису процесу розповсюдження шкідливих домішок в атмосфері — їх перенесення потоком вітру з врахуванням гравітаційного осадження таких домішок широко застосовується напівемпіричне рівняння турбулентної дифузії для приземного шару повітря як одне з конкретизованих представлень виразу (3) [1, 2]. Наведемо форму запису такого рівняння при виборі рухомої системи координат $oxyz$, при цьому напрямком осі ox вибираємо за напрямком швидкості діючого вітру $\vec{U} = u\vec{i} + 0\vec{j} + w\vec{k}$:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial t} + u \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} + w \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} \right) + \alpha C(x, y, z, t), \end{aligned} \quad (4)$$

де $k_x(t)$, $k_y(t)$, $k_z(t)$ — коефіцієнти турбулентної дифузії по осям x , y , z відповідно; u — швидкість вітру по осі ox ; $w = w_w + w_g$ — швидкість вітру по осі oz , w_w — вертикальна складова швидкості вітру (наприклад за рахунок конвекційних потоків), w_g — швидкість осадження шкідливих речовин; $\alpha C(x, y, z, t)$ — доданок, що характеризує вимивання опадами, або напіврозпад речовини (для випадку шкідливої речовини — радіоактивного аерозолі).

Рівняння (4) формулюється для частини простору $0 \leq x \leq L_x$, $0 \leq y \leq L_y$, $\delta \leq z \leq z_m$, на рівні $z = \delta$ задаються так звані граничні умови для концентрації $C(x, y, z, t)$. В загальній формі при врахуванні гравітаційного осадження частинок домішок повітря таку умову можна представити у наступному виді:

$$\left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} + w_g C = \beta C \right) \Big|_{z=\delta}, \quad (5)$$

де β — деяка константа, що має розмірність швидкості, при цьому в (5) $k_z \frac{\partial C}{\partial z}$ є вертикальна складова потоку за рахунок турбулентної дифузії, $w_g C$ — складова за рахунок гравітаційного осадження. При $\beta = 0$ умова (5) означає що потік забруднення на поверхні землі

відсутній (умова відбивання), при $\beta = \infty$ умова (5) приймає вигляд $s = 0$ при $z = \delta$ описує повне осадження на поверхню землі (умова поглинання), при $0 < \beta < \infty$ деякий проміжний випадок відбиття — поглинання.

Аналітичний розв'язок рівняння (4) можливий для випадку певних припущень стосовно його коефіцієнтів [1, 2]. Для випадку постійних коефіцієнтів в рівнянні (4) при наявності джерела викиду шкідливих речовин в атмосферу, яке знаходиться на певній висоті, та при крайовій граничній умові $\beta = 0$ на рівні $z = \delta(z = 0)$ розв'язок рівняння (4) за умови нехтування складовою $\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \right)$ має наступний вид:

$$C(x, y, z, t) = \frac{c(t)}{4\pi x \sqrt{k_y k_z}} \exp\left(-\frac{uy^2}{4k_y x}\right) \times \left(e^{\left[-\frac{u(z-h)^2}{4k_z x}\right]} + e^{\left[-\frac{u(z+h)^2}{4k_z x}\right]} \right), \quad (6)$$

де $c(t) = C(0, 0, h, t)$ — концентрація шкідливої домішки на виході з джерела викиду, яке має координати ($x=0$, $y=0$, $z=h$).

Розповсюдження забруднення поперек напрямку вітру (по координаті y) в представленні (6) має форму гаусових кривих з середнім квадратичним відхиленням $\left(\frac{u}{2k_y x}\right)^{-\frac{1}{2}}$, що збільшується при збільшенні координати x — віддалі від джерела забруднення. На основі розв'язку (6) можна отримати ряд частинних випадків, наприклад, розподіл забруднення біля поверхні землі в напрямку діючого від джерела вітру.

$$C(x, 0, 0, t) = \frac{c}{2\pi x \sqrt{k_y k_z}} e^{-\frac{uh^2}{4k_z x}}. \quad (7)$$

Використовуючи вираз (7) можна визначити значення найбільшої концентрації домішки C_{\max} , яка має місце на відстані $x_{C_{\max}} = \frac{uh^2}{4k_z}$:

$$C_{\max} = \frac{2c}{\pi e u h^2} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}}.$$

Для випадку граничної умови поглинання шкідливої домішки на поверхні землі $\beta = \infty$, вираз (6) приймає наступний вигляд:

$$C(x, y, z, t) |_{\beta=\infty} = \frac{c(t)}{4\pi x \sqrt{k_y k_z}} \exp\left(-\frac{uy^2}{4k_y x}\right) \times \\ \times \left(e^{\left[-\frac{u(z-h)^2}{4k_z x}\right]} - e^{\left[-\frac{u(z+h)^2}{4k_z x}\right]} \right).$$

Використовуючи вираз (6) можна також визначити величину швидкості осадження домішок $\sigma(x, y)$, що містяться в повітряному потоці:

$$\sigma(x, y) = \left(k_z \frac{\partial C(x, y, z)}{\partial z} \right) \Big|_{z=\delta=0} = \frac{cuh}{4\pi x^2 \sqrt{k_y k_z}} e^{-\frac{uy^2}{4k_y x} - \frac{uh^2}{4k_z x}}. \quad (8)$$

Функція (8) характеризує так званий слід забруднення на поверхні землі, при цьому максимальна швидкість осадження досягається по осі симетрії сліду на відстані $x_m = \frac{uh^2}{8k_z}$ від джерела викиду і

$$\text{становить } \sigma_m = \frac{4k_z}{\pi e^2 u h^3} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}}.$$

Отримані співвідношення (6-8) можна доповнити рядом практично підтверджених співвідношень для оцінки та визначення параметрів турбулентної дифузії та осадження домішок, що містяться в атмосфері. Так, наприклад, в [4] було запропоновано використовувати: при $u = const, k_y = const$ визначати коефіцієнт турбулентної

дифузії $k_z = k \left(\frac{z}{z_1} \right)^{1-\frac{1}{p}}$, де p – параметр, що характеризує термічну стійкість атмосфери (наприклад, для випадку конвекції $p < 0$), а при значенні висоти $z = 1$ приймати $k_1 = \frac{u}{40}$.

На практиці використовувати отримані вирази, які виведені з прив'язкою до прямокутної декартової системам координат, не завжди зручно. Це обумовлено тим, що необхідні точні визначення відносних координат джерела викиду та місця розташування вимірювань,

а також подальше перенесення отриманих результатів в абсолютні географічні координати. Тому за доцільне доповнити вирази (6-8) аналогічними виразами в криволінійній циліндричній системі координат. В такому випадку ми будемо мати справу тільки з напрямком на джерело викиду і з віддаленням від нього, що істотно полегшує процедуру проведення дистанційного аналізу розподілу радіоактивних аерозолів.

Для цього вводимо в розгляд криволінійну циліндричну систему координат (ρ, φ, z) , початком якої є, як і раніше, точка O — точка місцезнаходження джерела викиду.

Для випадку застосування циліндричної системи координат базове рівняння (4) прийме наступний вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C(\rho, \varphi, z, t)}{\partial t} + V_\rho \frac{\partial C(\rho, \varphi, z, t)}{\partial \rho} + V_\varphi \frac{1}{\rho} \frac{\partial C(\rho, \varphi, z, t)}{\partial \varphi} + \\ & + V_z \frac{\partial C(\rho, \varphi, z, t)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial \rho} \left(k_\rho \frac{\partial C(\rho, \varphi, z, t)}{\partial \rho} \right) + \\ & + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k_\varphi \frac{\partial C(\rho, \varphi, z, t)}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C(\rho, \varphi, z, t)}{\partial z} \right) + \\ & + \alpha C(\rho, \varphi, z, t), \end{aligned} \quad (9)$$

де, $V_\rho = u \cos \varphi + v \sin \varphi$, $V_\varphi = -u \sin \varphi + v \cos \varphi$, $V_z = w$ — проекції вектора швидкості в циліндричній системі координат; k_ρ, k_φ, k_z — відповідні коефіцієнти турбулентної дифузії.

Розв'язок рівняння (9) дозволяє отримати нові аналітичні вирази для визначення концентрації радіоактивних аерозолів в зоні осередку викиду по відомим їхніми концентраціям, швидкості і напрямку вітру на деякому віддаленні від місця їх викиду.

Методика проведення експерименту. Побудова систем контролю радіаційної безпеки атомних станцій (АС) та інших радіаційно-небезпечних підприємств атомної промисловості, як правило, базується на деякій концепції. У будь-якій концепції побудови такого роду систем лежить принцип вимірювання параметрів радіоактивного забруднення, що базується на: виборі датчиків, що вимірюють ті чи інші характеристики домішок в оточуючому середовищі - безпосередньо концентрацію (аспіраційні датчики) або потужність дози фотонного випромінювання (дозиметричні датчики), кількості датчиків і спосо-

бі їх розміщення навколо об'єкта та кількості вимірів для кожного датчика, або часу спостереження.

Тривалість періоду осереднення рівнів забруднення визначає і спосіб розміщення датчиків навколо АС — в напрямку найбільш ймовірних поширень викидів. Останні можна знаходити, виходячи з рози вітрів, що встановлюється з метеоспостережень протягом року та на основі наведених вище співвідношень. Подібні системи добре себе зарекомендували саме для аналізу рівнів забруднення при штатній роботі АС, але мають істотний недолік, оскільки вся інформація про радіаційну обстановку відноситься до минулого часу, що абсолютно неприпустимо при аварійних ситуаціях.

Здійснення штатної експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки, в тому числі і атомних електростанцій ефективно та своєчасно на даний час можна вирішувати з застосуванням сучасних технологій та методик, серед яких є застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Відбір шкідливих аерозолів поблизу джерел викиду може бути реалізований за допомогою встановлення на борту БПЛА фільтроежекційного пристрою (ФЕП) [3] як різновиду аспіраційного датчика за допомогою якого є можливим вимірювати концентрацію шкідливих домішок, що містяться в певній точці атмосфери. БПЛА при цьому обладнано також навігаційною системою та системою керування польотом, які забезпечують центр керування польотом всією необхідною польотною та навігаційною інформацією.

Таким чином, розглядаючи в якості засобу для проведення моніторингу забруднення вищенаведений БПЛА можна визначити концентрацію шкідливих домішок $C(x, y, z)$, а за його польотними даними є можливим розрахувати значення швидкості та напрямку дії вітру який діє на висоті польоту БПЛА відносно вибраної системи координат.

Так на прикладі здійснення польоту навколо можливого джерела викиду шкідливих радіоактивних аерозолів [3] можна визначити їх концентрацію безпосередньо на виході з джерела забруднення а на основі співвідношень (6, 7) встановити картину їх розповсюдження в приземних шарах атмосфери. При цьому напрямок дії вітру та його швидкість визначається на основі польотних і навігаційних параметрів польоту БПЛА, використовуючи наступні співвідношення:

$$K_w = \arcsin\left(\frac{V}{U} \sin(K_\varphi)\right), \quad \vec{U} = \sqrt{V^2 + W^2 - 2VW \cos(K_\varphi)}, \quad (10)$$

де K_w — кут дії вітру відносно напрямку на північ; V — повітряна швидкість БПЛА; U — величина швидкості вітру; W — швидкість БПЛА відносно земної поверхні (величини V та W вимірюються бортовою навігаційною системою літака); K_φ — кут зносу БПЛА, визначається як різниця кута курсу та путьового кута БПЛА (визначаються на основі даних бортової навігаційної системи літака).

На основі запропонованих співвідношень (6-10) розв'язується так звана "пряма" задача визначення розподілу шкідливих домішок в атмосфері — випадок коли є можливість визначення концентрації шкідливих домішок безпосередньо біля джерела викиду.

Для випадку, коли відсутня можливість безпосереднього вимірювання поблизу джерела викиду, пропонуємо вирішення так званої "оберненої" задачі - коли вимірювання концентрації проводиться на деякій відстані від місця розташування можливого джерела викиду. На основі польотних даних БПЛА та співвідношень (10) визначаються напрямок дії та швидкість вітру, а також за допомогою ФЕП вимірюється концентрація шкідливої домішки в даній точці простору, використовуючи при цьому наступні співвідношення можна розрахувати концентрацію домішок на виході потенційно-можливого віддаленого джерела. Отже, використовуючи розв'язок рівняння (9) в вигляді (11) можна розрахувати концентрацію домішок на виході віддаленого джерела.

$$c = C(\rho, \varphi, 0) 2\pi\rho \cos\varphi \sqrt{k_\varphi k_z} \left[e^{\frac{V_\rho h^2}{4k_z \rho \cos\varphi}} \right], \quad (11)$$

тут при відомій відстані до джерела концентрація шкідливої домішки на виході з джерела визначається вздовж напрямку вітру.

Для випадку, коли місце знаходження ймовірного джерела викиду не лежить на лінії дії вітру, шляхом розв'язку рівняння (9) маємо наступне співвідношення:

$$c = C(\rho, \varphi, z) 4\pi\rho \cos\varphi \sqrt{k_\varphi k_z} \left[\exp\left(-\frac{V_\rho(\rho \sin\varphi)^2}{4k_\varphi \rho \cos\varphi}\right) \times \right. \\ \left. \times \left(e^{\left[-\frac{V_\rho(H-h)^2}{4k_z \rho \cos\varphi}\right]} + e^{\left[-\frac{V_\rho(H+h)^2}{4k_z \cos\varphi}\right]} \right) \right]^{-1}. \quad (12)$$

В (12) ρ, φ, z — координати місця проведення вимірювань БПЛА щодо положення джерела викиду (відстань до об'єкта, кут, висота польоту).

Вирази (11), (12), що отримані на основі розв'язку рівняння (9), дозволяють оцінювати концентрацію радіоактивних аерозолів в області викиду. Вихідними даними при цьому є: значення місцевої вимірної концентрації аерозолів і координати місця зняття проб відносно джерела викиду аерозолів.

Результати математичного моделювання. Використовуючи співвідношення (6), (7), (10), (11), (12) проведено математичне моделювання розв'язків прямої (6,7,10) і зворотної (10,11,12) задач визначення параметрів розповсюдження радіоактивних аерозолів, які переносяться повітряним потоком.

Так для розв'язання прямої задачі визначення концентрації радіоактивних аерозолів, за умови що джерело викиду, наприклад, знаходиться на висоті 125 метрів з інтенсивністю 1 Бк/м³ при швидкості вітру 5 м/с; на основі (6) отримуємо наступну діаграму розподілу по мірі віддалення від джерела викиду на висоті 70м.

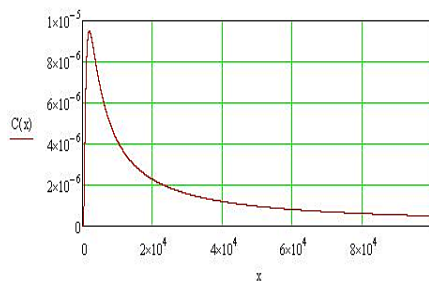
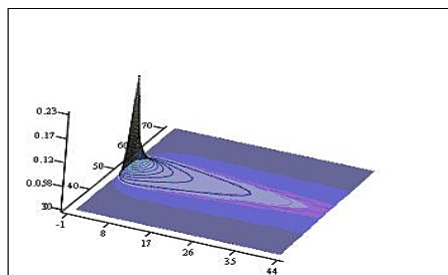
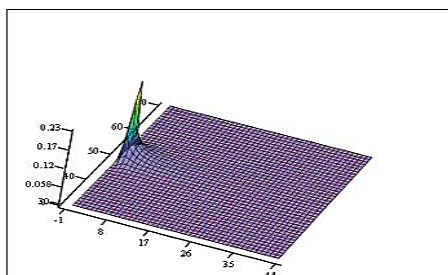


Рис. 1: Розподіл концентрації по напрямку вітру.

Проводячи математичне моделювання виразів, які визначають концентрацію радіоактивних аерозолів (7), можна отримати так званий тривимірний її розподіл, що ілюструє наступний рис.2.



С



С

Рис. 2: Просторовий розподіл концентрації радіоактивного аерозолю в області зони викиду.

Найбільший практичний інтерес представляють собою діаграми ліній рівня, які відповідають певним концентраціям радіоактивного аерозолю (див. Рис.3), що також є результатом розв'язання математичної моделі (9).

Таким чином наведені математична модель, її розв'язки, методика проведення натурного експерименту, і результати математичного моделювання, що є досить зручним підходом при аналізі розповсюдження радіоактивних аерозолів.

Висновки. На основі проведеного аналізу математичних моделей розповсюдження в приземному шарі атмосфери шкідливих домішок у вигляді полідисперсних аерозолів, встановлено ряд їх розв'язків для частинних випадків розповсюдження таких речовин.

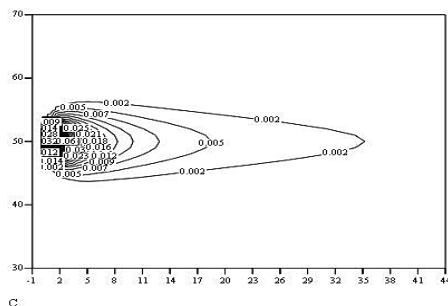


Рис. 3: Лінії рівнів концентрацій радіоактивного аерозолю.

Встановлені співвідношення дають можливість визначати ступінь забруднення області повітряного простору та земної поверхні поблизу джерел викиду. Крім того в роботі виведені співвідношення, що можуть використовуватися для дистанційного моніторингу джерел викиду шкідливих речовин, використовуючи при цьому для вирішення такої задачі сучасного засобу діагностики та моніторингу навколишнього простору — безпілотного літального апарату спеціально обладнаного фільтроелектронним пристроєм та відповідною навігаційною системою.

Наведені результати є можливим реалізувати при побудові відповідної методики дистанційного моніторингу небезпечних об'єктів промисловості.

Література

- [1] Мони́н А.С., Ягло́м А.М. Статистическая гидромеханика. — Ч.1. — М.: Наука. — 1959. — 640 с.
- [2] Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 июня 2010 г. — № 465.
- [3] Ключников А, Канченко В, Чепур Н. Беспилотный авиационный комплекс радиационной разведки // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — 2012. — Вип.1(23). —С. 300-312.

- [4] Лайхтман Д.Л., Гандин Л.С., Матвеев Л.Т, Юдин М.И. Основы динамической метеорологии. — Л. Гидрометеорологическое изд., 1955. — 647 с.