

Н. Л. Чепур¹, С. В. Бабак², А. П. Мариношенко³, А. В. Морозов³,
В. А. Канченко¹, Р. В. Карнаушенко³

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чернобіль

² ГП «НТЦ новітніх технологій НАН України», Київ

³ Національний технічний університет України «КПІ», Київ

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ АЭРОЗОЛЕЙ ВО ВРЕМЯ КОММУНАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Проведен аналітичний аналіз розповсюдження радіоактивного аерозолю на основі верифікації математическої моделі його руху і осадження. Отримана нелінійна математическа модель в криволінійних координатах і на її основі вираження для визначення активності джерела викиду, використовуючи при цьому результати вимірювання швидкості і напрямку вітру з одночасним збором аерозолів фільтроэжекціонним пристроєм, встановленим на безпілотному летальному апараті.

Ключевые слова: радіаційна аварія, аерозолі, безпілотний летальний апарат, фільтроэжекціонне пристрій.

Введение

Результатом радіаційних аварій (Чернобыль, Фукусима-1, лісний пожега в чернобыльській зоні) є забруднення за рахунок атмосферного переносу радіоактивних аерозолів. Методи вимірювання їх об'ємної і поверхневості активності відомі [1, 2]. Отримані при цьому результати дозволяють оцінити рівні активності і динаміку викидів в процесі аварії [3]. Однак ці результати досягаються після набора достаточного кількості інформації по шістьма визначеному післяаварійного часового інтервалу. В той же час представляє практичний інтерес визначення активності джерела в процесі аварії.

В свою чергу для описання процесу переносу радіоактивних мелкодисперсних аерозолів потрібно знати кінематику потоків повітря [4, 5]. В частині, для розрахунку розповсюдження аерозолів в атмосфері необхідні дані про вертикальний розподіл швидкості вітру при різних метеорологічних умовах [6]. Таким чином, навіть при великій кількості досліджень в цій області [7 - 18], все ще залишається відкритим питання достаточності простого і практично прийнятної для проведення експрес-аналізу аналітичного описання процесу розповсюдження радіоактивних аерозолів, дозволяючого визначати концентрацію в точках, віддалених від джерела викиду не тільки по поверхні, але і по висоті.

Постановка задачи

В даній роботі поставлена задача розробити математическу модель, описувальну

процес розповсюдження радіоактивних аерозолів. На основі отриманої моделі слід визначити вираження, дозволяють дистанційно оцінити концентрацію радіоактивних аерозолів поблизу і безпосередньо в області викиду, і оцінити чутливість методу визначення об'ємної активності аерозолів.

Математические модели атмосферного переноса аэрозолей

Основные положения и системы координат

В даному дослідженні розглядається точечний джерело викиду радіоактивних аерозолів, який знаходиться на певній висоті над поверхнею Землі.

Вводимо в розгляд неподвижну декартову прямокутну систему координат ($OXYZ$), в якій вісь OZ направлена вгору (по напрямку місцевій вертикалі), вісь OX - на схід, а вісь OY - на північ, початок системи координат O відповідає місцезнаходженню джерела викиду на площині XOY .

Область дослідження визначається в вигляді паралелепіпеда з нерівною нижньою межею, яка відображає неоднорідність рельєфу підстилюючої поверхні. Одночасно з системою координат $OXYZ$ вводимо додаткову "рухому" систему координат $OXYZ$, початок якої збігається з вищезгаданою точкою O , вісь OX направлена по напрямку вітру, вісь OZ направлена вгору (по напрямку місцевій вертикалі), вісь OY направлена таким чином, щоб система координат була правокутною.

© Н. Л. Чепур, С. В. Бабак, А. П. Мариношенко, А. В. Морозов, В. А. Канченко, Р. В. Карнаушенко, 2014

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

где L_x, L_y - размеры области по горизонтали, функция $z = \delta(x, y)$ описывает рельеф местности (шероховатость); z_m - положение верхней границы рассматриваемой области.

Перенос радиоактивных аэрозолей в атмосфере осуществляется ветровыми потоками воздуха с учетом его мелкомасштабных флуктуаций. Осредненный поток имеет адвективную и конвективную составляющие, а осреднение флуктуационного движения можно интерпретировать как диффузию на фоне связанного с ним основного усредненного движения.

Сформулируем задачу переноса аэрозольных субстанций в атмосфере в общем виде.

Пусть $C(x, y, z, t)$ - концентрация в атмосфере радиоактивного аэрозоля, который движется в потоке воздуха с некоторой скоростью $\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$. Эта скорость представляет собой некоторую функцию координат x, y, z и времени t ; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - единичные орты в направлении осей системы координат $OXYZ$ соответственно; u, v, w - проекции вектора скорости $\vec{U}(x, y, z, t)$ на оси системы координат.

Модели распространения радиоактивных аэрозолей в атмосфере

Процесс переноса радиоактивных примесей вместе с воздушным атмосферным потоком можно описать в виде уравнения, представляющего собой равенство нулю полной производной от концентрации $C(x, y, z, t)$ примеси [4]

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

принимая во внимание, что $\frac{dx}{dt} = u, \frac{dy}{dt} = v, \frac{dz}{dt} = w$, получим:

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

Поскольку для нижних слоев атмосферы хорошо выполняется закон сохранения массы, определяемый уравнением неразрывности, получим

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

Таким образом,

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

Уравнение (2) для случая распространения радиоактивных аэрозолей можно конкретизировать, если учесть, что часть аэрозоля вступает в реакцию с внешней средой и происходит его распад с постоянной времени $\tau = \frac{1}{\alpha}$, а также учесть источник загрязнения, описываемый некоторой функцией $f(x, y, z, t)$. В таком случае уравнение (2) можно преобразовать к виду

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

Точное решение уравнения (3), которое является нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных, можно получить численными методами для случая, когда известны значения функции $\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ в заданных точках пространства и в конкретные моменты времени. Если же информации про компоненты вектора скорости недостаточно, то в этом случае целесообразно использовать различные приближения и допущения [6].

Для описания процесса распространения радиоактивных аэрозолей в атмосфере и их переноса потоком ветра с учетом гравитационного осаждения таких примесей широко применяются полуэмпирические уравнения турбулентной диффузии для приземного слоя воздуха - как одно из конкретизированных представлений выражения (3) [4, 6]. Приведем форму записи такого уравнения при выборе подвижной системы координат $OXYZ$. Направление оси OX выбираем по направлению вектора скорости действующего ветра: $\vec{U} = u\vec{i} + 0\vec{j} + w\vec{k}$. Для таких условий получим

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

где $k_x(t), k_y(t), k_z(t)$ – коэффициенты турбулентной диффузии по осям x, y, z соответственно; u – проекция скорости ветра на ось OX ; $w = w_w + w_g$ – проекция скорости ветра на ось OZ ; w_w – вертикальная составляющая скорости ветра (например, за счет конвекционных потоков); w_g – скорость осаждения радиоактивных аэрозолей; $\alpha C(x, y, z, t)$ – слагаемое, характеризующее периодом полураспада.

Уравнение (4) сформулировано для части пространства $0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, \delta \leq z \leq z_m$ и на границе $z = \delta$ задаются граничные условия $C(x, y, z, t)$. Конкретизировать такие граничные условия с учетом гравитационного осаждения радиоактивных аэрозолей можно в виде

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

где β – некоторая константа, которая имеет размерность скорости, при этом в формуле (5) присутствует вертикальная составляющая потока за счет турбулентной диффузии $k_z \frac{\partial C}{\partial z}$, а также составляющая за счет гравитационного осаждения $w_g C$.

Аналитическое решение уравнения (4) возможно для случая определенных допущений относительно его коэффициентов [4, 5]. Так, для случая постоянных коэффициентов и при условии наличия источника выброса, находящегося на определенной высоте, а также при граничном условии $\beta = 0$ на уровне $z = \delta$ ($z = 0$) (полное отражение частиц от поверхности) аналитическое решение уравнения (4) имеет следующий вид:

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

где $c(t) = C(0, 0, h, t)$ – концентрация радиоактивного аэрозоля на выходе источника загрязнения с координатами $(x = 0, y = 0, z = h)$. Составляющей уравнения $\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \right)$, описывающей непостоянство диффузии, пренебрегаем.

Наибольший практический интерес представляет собой случай, когда необходимо проанализировать

распределение концентрации радиоактивного аэрозоля от источника выброса в направлении действующего в атмосфере ветра. Тогда решение уравнения (6) – распределение концентрации вдоль оси подвижной системы координат OX – примет следующий вид:

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

При этом распределение аэрозолей в поперечных направлениях к направлению действующего ветра (по координате y) в выражении (6) имеет нормальное распределение со среднеквадратическим отклонением $\left(\frac{u}{2k_y x}\right)^{-\frac{1}{2}}$.

Используя выражение (7), можно оценить величину наибольшей концентрации радиоактивного аэрозоля C_{\max} , которая находится на расстоянии $x_{C_{\max}} = \frac{uh^2}{4k_z}$:

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

В случае полного поглощения радиоактивного аэрозоля поверхностью Земли (чему соответствует граничное условие (5) при $\beta = \infty$) выражение (6) примет вид

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

Используя выражение (6), можно также определить скорость осаждения радиоактивного аэрозоля $\sigma(x, y)$, который содержится в потоке воздуха:

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

Функция (8) характеризует след загрязнения на поверхности Земли. При этом максимальная скорость осаждения достигается по оси симметрии следа на расстоянии $x_m = \frac{uh^2}{8k_z}$ от источника

выброса и составляет $\sigma_m = \frac{4k_z}{\pi e^2 u h^3} \sqrt{\frac{k_z}{k_y}}$.

Выражения (6) - (8) обычно дополняют рядом практически подтвержденных соотношений для оценки и определения параметров турбулентной диффузии и осаждения в атмосфере радиоактивных аэрозолей. Например, в работе [4] было предложено: при $u = const$, $k_y = const$ определять коэффициент турбулентной диффузии в виде $k_z = k \left(\frac{z}{z_1} \right)^{1-\frac{1}{p}}$, где p - параметр, который характеризует термическую устойчивость атмосферы (например, для случая конвекции $p < 0$), а при значении высоты $z = 1$ принимать $k_1 = \frac{u}{40}$.

На практике использовать полученные выражения, которые выведены с привязкой к прямоугольным декартовым системам координат, не всегда удобно. Это обусловлено тем, что необходимы точные определения относительных координат источника выброса и местоположения измерений, а также последующий перенос полученных результатов в абсолютные географические координаты. Поэтому представляется целесообразным дополнить выражения (6) - (8) аналогичными выражениями в криволинейной цилиндрической системе координат. В таком случае мы будем иметь дело только с направлением на источник выброса и с удалением от него, что существенно облегчает процедуру проведения дистанционного анализа распределения радиоактивных аэрозолей.

Для этого вводим в рассмотрение криволинейную цилиндрическую систему координат (ρ, φ, z) , началом которой является, как и ранее, точка O - точка местонахождения источника выброса.

Для случая применения цилиндрической системы координат базовое уравнение (4) примет следующий вид:

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

где $V_\rho = u \cos \varphi + v \sin \varphi$, $V_\varphi = -u \sin \varphi + v \cos \varphi$, $V_z = w$, - проекции вектора скорости в цилиндри-

ческой системе координат; k_ρ, k_φ, k_z - соответствующие коэффициенты турбулентной диффузии.

Решение уравнения (9) позволяет получить новые аналитические выражения для определения концентрации радиоактивных аэрозолей в зоне очага выброса по известным их концентрациям, скорости и направлению ветра на некотором удалении от места их выброса.

Метод измерения

Построение систем контроля радиационной безопасности базируется на измерении параметров радиоактивного загрязнения путем заранее определенного количества измерений или времени наблюдения [6]. Подобные системы хорошо себя зарекомендовали именно для анализа уровней загрязнения при штатной работе источников, но имеют существенный недостаток, поскольку вся информация о радиационной обстановке относится к прошедшему времени, что недопустимо при аварийных ситуациях.

Определение активности за время радиационной аварии можно решать с применением современных технологий и методик, среди которых предлагается применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [19].

Отбор радиоактивных аэрозолей над источником выброса либо вблизи него может быть реализован с помощью установки на борту БЛА фильтроэжекционного устройства (ФЭУ) как альтернативы аспирационного датчика [19]. С помощью ФЭУ можно измерять концентрацию вредных примесей, содержащихся в определенной точке атмосферы Земли.

Производительность созданного нами ФЭУ в зависимости от скорости потока воздуха [20] показана на рис. 1.

На этом рисунке обозначены объемы для данных скоростей через поперечное сечение ФЭУ (кривая 1), а калибровочная характеристика представлена кривой 2. Из графика следует, что, например, при скорости воздуха БЛА 70 км/ч через фильтроткань ФЭУ пройдет 32 м^3 воздуха за 1 ч полета. За 2 мин полета имеем около 1 м^3 , что позволяет измерить объемную активность ^{137}Cs величиной 1 Бк/м^3 . В [3] показано, что при лесном пожаре в чернобыльской зоне средняя за период пожара объемная активность ^{137}Cs достигала $18,5 \text{ Бк/м}^3$.

БЛА оборудован также навигационной системой и системой управления полетом, которые обеспечивают центр управления полетом всей необходимой полетной и навигационной информацией. Таким образом, рассматривая в качестве средства для проведения мониторинга загрязне-

ния БЛА, можно определить концентрацию вредных примесей $C(x, y, z)$, а по его полетным данным определить значения скорости и направления действия ветра на высоте полета БЛА относительно опорной системы координат.

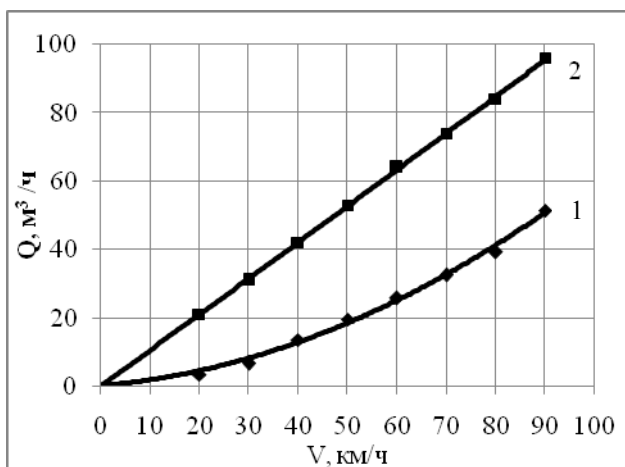


Рис. 1. Производительность ФЭУ (Q) в зависимости от скорости воздушного потока (V).

Так, на примере осуществления полета вокруг возможного источника выброса вредных аэрозолей [21] можно определить их концентрацию непосредственно на выходе из источника загрязнения, а на основе соотношений (6) и (7) установить картину их распространения в приземных слоях атмосферы. При этом направление действия ветра и его скорость определяется на основе полетных и навигационных параметров полета БЛА из соотношений

$$K_w = \arcsin\left(\frac{V}{U} \sin(K_\varphi)\right),$$

$$\bar{U} = \sqrt{V^2 + W^2 - 2VW \cos(K_\varphi)}, \quad (10)$$

где K_w - угол действия ветра относительно направления на север; V - скорость воздуха БЛА; U - величина скорости ветра; W - скорость БЛА относительно земной поверхности (величины V и W измеряются бортовой навигационной системой летательного аппарата); K_φ - угол сноса БЛА, определяется как разница угла курса и путевого угла БЛА (на основе данных бортовой навигационной системы летательного аппарата).

Из соотношений (6) - (8) и (10) решается "прямая" задача определения распределения вредных примесей в атмосфере – случай, когда есть возможность определения концентрации вредных примесей непосредственно у источника выброса.

Для случая, когда отсутствует возможность непосредственного измерения вблизи источника выброса, решается "обратная" задача – измерение концентрации производится на некотором расстоянии от места расположения источника выброса. При этом на основе полетных данных БЛА и соотношений (10) определяются направление и скорость ветра, а с помощью ФЭУ измеряется концентрация вредной примеси в данной точке пространства. Используя решение уравнения (9) в виде (11), можно рассчитать концентрацию примесей на выходе удаленного источника:

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

Здесь при известном расстоянии до источника концентрация вредной примеси на выходе из источника определяется вдоль направления ветра.

Для случая, когда местонахождение источника выброса не лежит на линии действия ветра, путем решения уравнения (9) получим следующее соотношение:

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

В соотношении (12) ρ, φ, z - координаты места проведения измерений БЛА относительно положения источника выброса (расстояние до объекта, угол, высота полета).

Выражения (11) и (12), полученные на основе решения уравнения (9), позволяют оценивать концентрацию радиоактивных аэрозолей в зоне очага выброса. Исходными данными при этом являются: значение местной измеренной концентрации аэрозолей и координаты места снятия проб относительно очага выброса аэрозолей.

Результаты математического моделирования

Используя соотношения (6), (7), (10) - (12), проведено математическое моделирование решений прямой (6), (7), (10) и обратной (10) - (12) задач определения параметров распространения радиоактивных аэрозолей, переносимых потоком воздуха.

Так, для решения прямой задачи определения концентрации радиоактивных аэрозолей при условии, что источник выброса, например, нахо-

дится на высоте 130 м с интенсивностью 1000 Бк/м³ при скорости ветра 5 м/с, на основе уравнения (6) получим диаграмму распределения по мере удаления от источника выброса на высоте 70 м (рис. 2).

На рисунке приведена картина распространения радиоактивного аэрозоля по направлению ветра на протяжении 10 км от очага выброса.

Проводя математическое моделирование выражений, определяющих концентрацию радиоактивных аэрозолей (7), можно получить трехмерное ее распределение, иллюстрируемое графиками на рис. 3.

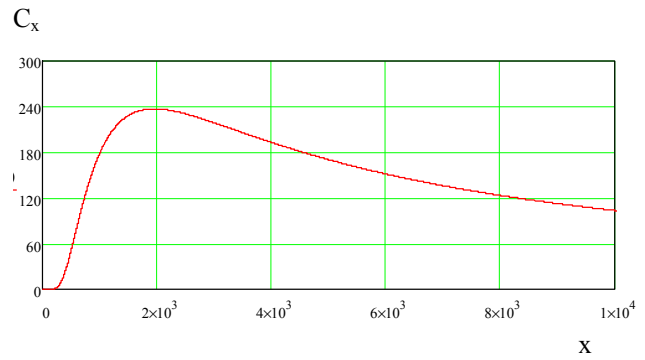


Рис. 2. Распределение концентрации по направлению ветра.
(См. цветной рис. на сайте журнала.)

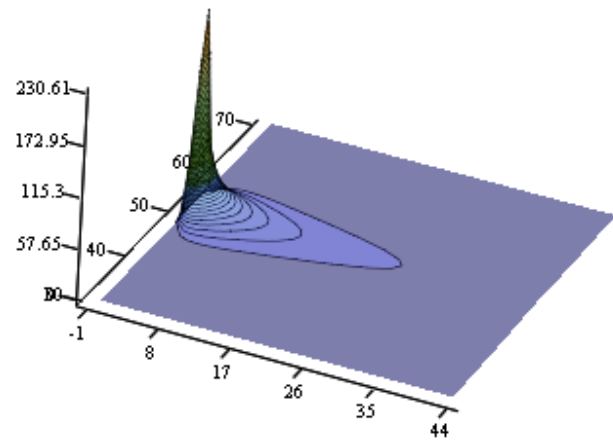
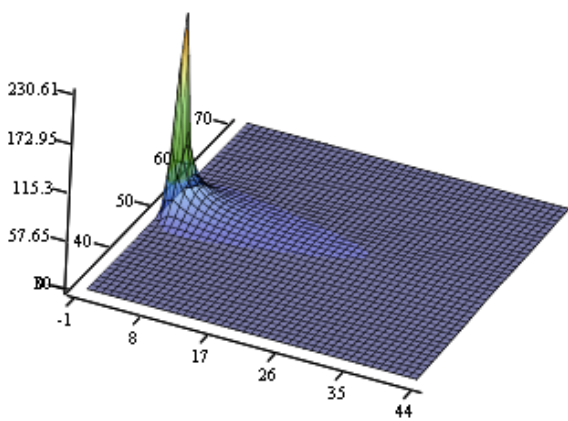


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации радиоактивного аэрозоля в области зоны выброса. (См. цветной рис. на сайте журнала.)

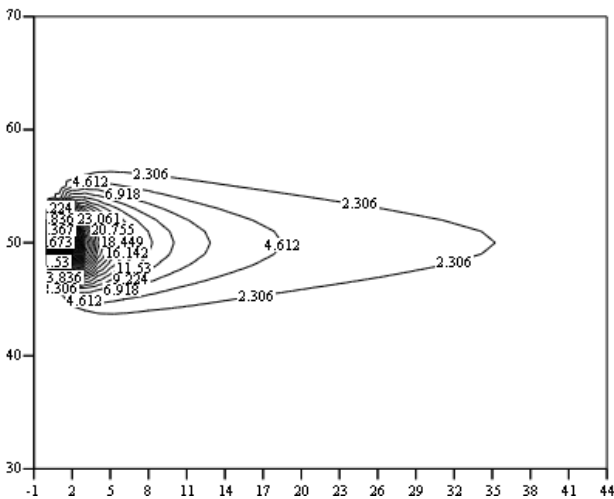


Рис. 4. Линии уровней концентраций радиоактивного аэрозоля.

Наибольший практический интерес представляют собой диаграммы линий уровня, соответствующих определенным концентрациям радиоактивного аэрозоля (рис. 4), которые также являются результатом решения математической модели (9).

Таким образом, приведенные математическая модель, ее решения, методика проведения натур-

ного эксперимента и результаты математического моделирования являются достаточно удобным подходом при анализе распространения радиоактивных аэрозолей.

Выводы

На основе проведенного анализа математических моделей распространения в приземном слое атмосферы радиоактивных аэрозолей установлен ряд их решений для частных случаев распространения аэрозолей.

Установленные соотношения дают возможность определять степень загрязнения области воздушного пространства вблизи источников выброса.

Выведены новые соотношения и разработана новая методика, которые могут использоваться для дистанционного анализа источников выброса с использованием для решения такой задачи полученных в работе соотношений (11) и (12), а также современного средства диагностики и мониторинга окружающей среды - БЛА, который оборудован ФЭУ и соответствующей навигационной системой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наставление* гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением природной среды. - Изд. 2-е перераб. / Под ред. К. П. Махонько. - М.: Гидрометиздат, 1982. - 59 с.
2. *Гаргер Е.К., Каптур В.А.* Измерение радиоактивных аэрозолей в приземном слое атмосферы 30-км зоны ЧАЭС и окружающей территории // Третьи Петряновские чтения, Москва, 19 - 21 июня 2001 г.: Тр. - М.: РИЦ МГИУ, 2001. - С. 163 - 175.
3. *Талерко М.М.* Реконструкція і прогнозування радіоактивного забруднення внаслідок комунальної радіаційної аварії за допомогою моделювання атмосферного перенесення (на прикладі аварії на Чорнобильській АЕС) // Дис. ... д-ра техн. наук. - К., ПБ АЕС НАН України, 2011. - 417 с.
4. *Монин А. С. Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч. 1. - М.: Наука, 1959. - 640 с.
5. *Лайхтман Д.Л., Гандин Л.С., Матвеев Л.Т., Юдин М.И.* Основы динамической метеорологии. - Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1955. - 647 с.
6. *Приказ* Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 июня 2010 г. № 465.
7. <http://www.uap.kiev.ua/UkrAtomInstruments>
8. http://granat-e.ru/catalog_aupov.htm
9. http://www.ess.ru/sites/default/files/files/articles/2002/05/2002_05_03.pdf
10. <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?fn=hazard&f=structure>
11. *Гаргер Е.К., Лев Т.Д., Тищенко О.Г., Талерко Н.Н.* Перенос радиоактивного аэрозоля объекта «Укрытие» в пограничном слое атмосферы // Наукові і технічні аспекти Чорнобиля: Зб. наук. ст. / За заг. ред. В. М. Глигало, А. В. Носовського. - К.: Політехніка, 2002. - Вип. 4.
12. *Гаргер Е.К., Каптур В.А., Скоряк Г.Г. и др.* Мониторинг радиоактивных аэрозолей на промплощадке объекта «Укрытие» // 6th Annual Conf. of Int. Chernobyl Center, 9 – 12 Sep. 2003, Slavutich, Ukraine: Presentation abstracts. - Slavutich, 2003. - P. 172.
13. *Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А.* Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» 1986 - 2006 гг. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008. - 456 с.
14. *Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.А. и др.* Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2006 г. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2007. - Вип. 7. - С. 116 - 121.
15. *Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.А. и др.* Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2009 г. // Там же. - 2010. - Вип. 13. - С. 111 - 122.
16. *Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.А. и др.* Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2010 г. // Там же. - 2011. - Вип. 17. - С. 98 - 105.
17. *Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.А., В.А. Краснов.* Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2011 г. // Там же. - 2012. - Вип. 19. - С. 94 - 103.
18. <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2072248>
19. *Ключников А., Канченко В., Чепур Н.* Беспилотный авиационный комплекс радиационной разведки // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - 2012. - Вип. 1(23). - С. 300 - 312.
20. *Мариношенко А., Чепур Н.* Экспериментальное исследование производительности фильтроэжекционного устройства // XVIII Міжнар. наук.-техн. симп. "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS - технології", 2013. 10 - 15 вересня, Алушта (Крим). - С. 152 - 155.
21. *Бабак С., Богачук И., Канченко В. и др.* Радиоактивные аэрозоли Чернобыля на границе зоны отчуждения // Там же. - С. 148 - 150.

**М. Л. Чепур, С. В. Бабак, О. П. Мариношенко, А. В. Морозов,
В. Я. Канченко, Р. В. Карнаушенко**

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ АКТИВНОСТІ АЕРОЗОЛІВ
ПІД ЧАС КОМУНАЛЬНОЇ РАДІАЦІЙНОЇ АВАРІЇ
З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

Проведено аналітичний аналіз поширення радіоактивного аерозолю на основі верифікації математичної моделі його руху та осадження. Отримано нелінійну математичну модель у криволінійних координатах і на її основі вираз для визначення активності джерела викиду, використовуючи при цьому результати вимірювання швидкості та напрямку вітру з одночасним забором аерозолів фільтроежекційним пристроєм, що установлений на безпілотному літальному апараті.

Ключові слова: радіаційна аварія, аерозолі, безпілотний літальний апарат, фільтроежекційний пристрій.

**M. L. Chepur, S. V. Babak, O. P. Marinoshenko, A. V. Morozov,
V. Ya. Kanchenko, R. V. Karнаushenko**

**METHOD FOR DETERMINING THE ACTIVITY OF VOLUME AEROSOLS
DURING COMMUNAL RADIATION ACCIDENT USING UNMANNED AIRCRAFT**

Analytical analysis of the spread of the radioactive aerosol-based verification of the mathematical model of its movement and deposition was carried out. Nonlinear mathematical model in curvilinear coordinates and on its base the expression for determining the activity of the emission source, using the results of measurements of wind speed with simultaneous fence aerosols filtration unit installed on unmanned aircraft was received.

Keywords: radiation accident, aerosols, an unmanned aerial vehicle, filtration unit.

Надійшла 22.10.2013
Received 22.10.2013