

Алгоритмы мониторинга окружающей среды для раннего прогнозирования пожароопасных ситуаций

О.В. Емельянова, С.В. Ефимов, О.Б. Кочергин

Аннотация— Существующие системы контроля аварийных выбросов осуществляются на стационарных постах и обеспечивают непрерывное измерение концентраций токсичных газов в воздухе, с помощью необходимого оборудования и автоматических газоанализаторов. Однако стационарность таких датчиков-анализаторов загазованности и/или запыленности делает невозможной обеспечение такого контроля на всех участках объекта и окружающей его территории. Таким образом, существует необходимость эффективного и непрерывного контроля над концентрацией вредных веществ в воздухе над всей территорией промышленных объектов, которую можно решить с помощью установленного на борту беспилотный летательный аппарат (БЛА) газоанализатора. В работе рассмотрены методы детектирования источников возгорания по выделяемой концентрации вредных веществ в воздухе. Рассмотрены два алгоритма перемещения БЛА в пространстве: первый предназначен для измерения уровня концентрации загрязнений во всей области загрязнения и второй – последовательного мониторинга, который выполняет функцию непосредственного детектирования источника возгорания. В результате исследований разработан алгоритм управления движением мобильной приборной платформы к источнику токсичного газа с учетом изменения концентрации и выбора вида заданной траектории движения, позволяющий отслеживать изменение динамики концентрации токсичных газов в окрестности объекта наблюдения.

Ключевые слова— БПЛА, алгоритм, загрязняющее воздействие, концентрация вещества, источник загрязнения.

Статья получена 7 марта 2023 г.

Работа подготовлена при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека».

The paper was prepared with the support of the Strategic Project «Priority-2030. Creation of robotic tools to expand the functionality of a person».

О.В. Емельянова, Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, Курск, 305040, РФ (e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru).

С.В. Ефимов, Воронежский институт МВД России, проспект Патриотов, 53, Воронеж, 394065, РФ (e-mail: sclione@ya.ru).

О.Б. Кочергин, Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, Курск, 305040, РФ (e-mail: oleg.kochergin01@inbox.ru).

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост числа пожаров, материальных потерь, гибели людей является следствием бурного развития техники и технологий, концентрации производства, создания новых пожароопасных материалов, увеличения плотности населения, отсутствия в достаточном количестве средств обнаружения возгораний на ранней стадии, средств пожаротушения, отсутствия навыков пожаротушения и безопасного поведения во время пожаров [1]. Каждый пожар, согласно принятой классификации, по времени проходит 4 основные стадии: начальную; развивающуюся; развитую; затухающую. Как показывает практика, важнейшим фактором снижения числа пожаров является разработка и создание системы раннего обнаружения источников загрязнения при возгораниях (РОИЗ) на начальной стадии, то есть необходимо обеспечить требование о своевременности обнаружения пожара, и, в каждом конкретном случае [2],[3]. Поэтому основной задачей является обнаружение источника загрязнений при возгорании за время, необходимое для включения систем пожаротушения и организации безопасной эвакуации людей. Последние годы активно исследуются и создаются системы прогнозирования пожароопасных ситуаций на основе применения робототехнических систем, что дает существенное повышение уровня пожарной безопасности гражданских объектов и промышленных предприятий. Этот процесс является многофакторным и комплексным, поэтому создание интеллектуальных систем прогнозирования пожароопасных ситуаций на ранней стадии требует применения технических решений, реализуемых с применением роботизированных технологий на новых принципах и элементной базе. Одним из важнейших этапов при этом, является разработка алгоритмов управления движением роботизированных интеллектуальных систем прогнозирования пожароопасных ситуаций [4],[5].

II. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В ведущих странах мира активно исследуются и получают практическую реализацию системы прогнозирования пожароопасных ситуаций на ранней стадии [6]. Одним из базовых принципов защиты при возникновении загрязнений атмосферы при возгорании является скорейшее его обнаружение. Здесь основную роль

играют системы пожарной сигнализации, состоящей из технических средств обнаружения возгорания и передачи соответствующего сигнала системам оповещения и пожаротушения [7]. Большое внимание уделяется совершенствованию методов идентификации процесса возгорания на основе современных сенсорных устройств на новых физических принципах. Получают распространение пожарные извещатели фирм: Bosch, Apollo, SystemSensor, Novar и др [8]. Создание малогабаритных газочувствительных сенсоров, позволяет перейти к созданию мобильных летающих платформ, значительно повышающих достоверность обнаружения вредных газов (ВГ) CO, CO₂, HCl и других, что, как следствие, повышает эффективность систем РОИЗ, снижается число ложных срабатываний и открываются новые возможности для создания противопожарных систем [9],[10]. Установка газочувствительных сенсоров (ГС) на роботизированные мобильные устройства (РМУ) открывает новые возможности для разработки и создания методов раннего обнаружения возгораний [11]. Применение таких мобильных систем мониторинга позволяет высокоточно, в автоматическом режиме определять координаты источника возгорания [12],[13].

III. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Одной из основных задач системы РОИЗ является обнаружение повышенной концентрации ВГ за время, необходимое для включения систем пожаротушения и оповещения для организации безопасной эвакуации людей [14],[15],[16].

Рассмотрим критерии, определяющие эффективную работу системы РОИЗ. Одним из таких критериев является точность определения координат источника загрязнений при возгорании K_1 , который зависит от размера зоны мониторинга:

$$K_1 = K_1(\varepsilon), \quad (1)$$

где $\varepsilon = \bar{r}_{A_{ml}} - \bar{r}_{A_{ml}}$ – ошибка между истинным и расчетным радиусом-вектором ИЗ.

Вторым критерием является быстродействие K_2 , определяемое временем T , которое можно оценить как сумму временных затрат, необходимых для зондирования ЗМ – T_1 , обработки информации ГА – T_2 и передачи сигналов – T_3 , определяемое быстродействием бортовых вычислителей, протоколами и алгоритмами обработки сигналов.

$$K_2 = K_2(T) = \sum_{i=1}^3 \beta_i T_i, \quad (2)$$

где β_i - весовые коэффициенты.

Следующим критерием является мультикритериальность сенсоров, применяемых для оценки концентрации вредных газов K_3 . Исследования показывают, что при возгорании материалов выделяются различные токсичные газы. При горении хлопка

выделяется моноксид углерода CO, то при горении синтетике–хлористый водород HCl, углекислый газ CO₂, синильная кислота и другие. Поэтому возникает необходимость разработки мультикритериального детектора, который, содержит несколько сенсоров, которые реагируют на различные физические факторы, такие как тепло, дым и выделяющиеся от очага газы, Критерий качества РОИЗ K_3 представим в виде:

$$K_3 = \sum_{j=1}^3 \alpha_j k_j, \quad (3)$$

где k_j – j -я концентрация ВВ, измеряемая многокритериальным сенсором; α_j весовые коэффициенты.

На сегодняшний день существуют малогабаритные газоанализаторы монооксида углерода, хлороводорода, которые выполнены как в стационарном, так и переносном исполнении. Такие газоанализаторы устанавливаются на РМУ, образуя мобильный многокритериальный газовый анализатор (ММГА). Основной задачей ММГА является определение координат источника возгорания за максимально короткий период времени, поэтому, для комплексной оценки эффективности работы РОИЗ предлагается использовать интегральный критерий K , рассчитываемый как:

$$K = \sum_{k=1}^3 \gamma_k K_k, \quad (4)$$

где γ_k - весовые коэффициенты.

Рассмотрим два алгоритма движения ММГА к источнику токсичного газа.

1. Алгоритм последовательного мониторинга окружающей среды

Рассмотрим задачу поиска источника загрязнений (ИЗ) и планирования траектории движения к нему по алгоритму последовательного мониторинга окружающей среды

В качестве основного критерия используем уровень концентрации CO в воздухе, регистрируемый мультикритериальным газовым анализатором установленным на беспилотном летательном аппарате (БЛА). Алгоритм последовательного мониторинга (АПМ) окружающей среды позволяет производить полет БЛА по заданной программе, реализуя выбранную оператором траекторию (рис. 1). Положение БЛА определяется радиус-вектором:

$$\bar{r}_{OA} = (x, y, z)^T,$$

где x, y, z – координаты точки A_{ij} .

Алгоритм управления движением определяет взлет БЛА из начальной точки $O(0;0)$ на определенную высоту h_1 . Далее происходит полет в горизонтальной плоскости в соответствии с полетным заданием. Для подробного осмотра отдельных участков местности в пределах района инспектирования и поиска источника загрязнения (ИЗ) применяются прямолинейные параллельные маршруты,

при этом учитывается возможности бортового газоанализатора.

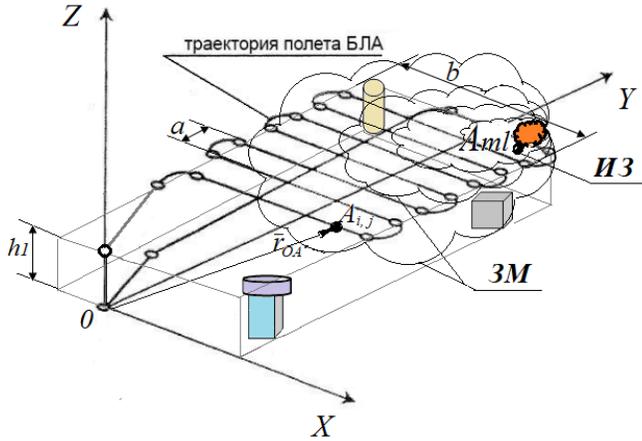


Рис.1.Схема движения БЛА по алгоритму последовательного мониторинга

Преимуществами такого алгоритма последовательного мониторинга является относительная простота планирования координат точек, в которых определяется концентрация СО, наличие протяженных участков прямолинейного горизонтального полета БЛА. Точки $A_{i,j} (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n)$, в которых измеряется концентрация, представим в виде матрицы:

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{n0} \\ A_{i0} & A_{i,j} & A_{in} \\ A_{n0} & A_{nj} & A_{nn} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где A_{00} – начальная точка; A_{nn} – конечная точка; A_{ni} – максимальное значение концентрации вредных веществ.

Для определения направления движения выполняются пробные движения вдоль выбранных координат.

Будем рассматривать зависимость K_{CO} от координат точки, в которой определяется K_{CO} в виде:

$$K_{CO} = K_{CO}(x, y, z). \quad (6)$$

В рассматриваемом случаев достаточно определить координаты источника возгорания в горизонтальной плоскости, расположенной на некотором уровне $z = h_1$, то есть рассматривать двумерный случай:

$$K_{CO} = K_{CO}(x, y) \Rightarrow \max. \quad (7)$$

На корпусе БЛА установлены GPS-навигатор, ультразвуковой дальномер, определяющий расстояние до препятствия, информация с которого позволяет корректировать траекторию движения БЛА, термометр. При приближении к источнику возгорания возрастает температура t^0 окружающей среды, которую контролирует бортовой сенсор. Если выполняется

условие, что $t^0 < t_0^0$ где t_0^0 – предельная температура, дальнейший полет в сторону источника возгорания прекращается.)

Замеры концентрации СО осуществляются в заданных точках $A_{i,j}$, что позволяет построить карту распределения концентрации СО (КРК) в исследуемой зоне мониторинга (ЗМ). Размеры ЗМ можно определить по формуле:

$$S = a \times (N - 1)b,$$

где S - площадь ЗМ; b - длина одного прохода; N - количество проходов; a - расстояние между проходами.

В источнике загрязнения (ИЗ) концентрация СО достигает максимальных значений, поэтому по КРК можно определить с заданной точностью координаты ИЗ. Недостатком рассматриваемого метода является достаточно высокая трудоемкость из-за необходимости обследовать и измерять концентрацию во всех точках ЗМ. Так же недостатком является длительность построения КРК, которая может быть получена только после облета всей ЗМ и обработки данных во всех точках сбора информации о концентрации СО.

2. Алгоритм градиентного движения к источнику возгорания

Для повышения быстродействия системы прогнозирования пожароопасных ситуаций на ранней стадии, разработан метод определения координат источника загрязнений (МОКИЗ) в основе которого лежит алгоритм градиентного движения (АГД) к источнику возгорания. Так как максимальный уровень концентрации СО находится в ИЗ, по мере удаления от которого концентрация ВВ уменьшается, то есть возникает ненулевой градиент концентрации. Бортовой анализатор газа БЛА, позволяет измерять концентрацию K_{CO} и градиент концентрации ($ГК_{CO}$) в различных точках контролируемой ЗМ, что обеспечивает возможность построения траектории движения БЛА по градиенту в сторону максимальной концентрации СО.

В основе алгоритма лежит метод покоординатного движения в сторону максимального значения K_{CO} , в соответствии с которым, движение БЛА происходит поэтапно, причем очередное движение осуществляется вдоль каждой из координат на заданный шаг.

Таким образом, определив в выбранной системе координат начальное положение БЛА можно двигаться в сторону увеличения K_{CO} по одной из координат до момента, когда K_{CO} достигает максимума. Далее, происходит движение по второй координате и определяется максимум K_{CO} . Таким образом, определяются координаты ИЗ. Алгоритм покоординатного градиентного движения БЛА к ИЗ при возгорании обеспечивает быстрое продвижение БЛА, так как число измерений концентрации стремится к минимуму, а точность определения координат ИЗ задается условиями завершения процесса поиска, что позволяет, приблизиться к точке с максимальной концентрацией СО за

минимальное конечное число шагов. При этом матрица, определяющая точки, в которых измеряется концентрация, принимает вид:

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} A_{00} & 0 & 0 \\ A_{i0} & 0 & 0 \\ A_{n0} & A_{nj} & A_{nm} \end{vmatrix}.$$

При движении БЛА по диагональным точкам в сторону точки A_{nm} с максимумом концентрации, АГД реализуется максимально эффективно по критерию быстрейшего действия, при условии, что в каждой новой точке, концентрация K_{CO} превышает ее значение в предыдущей точке $K_{CO_{i+1,j+1}} > K_{CO_{i,j}}$. Матрица, определяющая точки, в которых измеряется концентрация при диагональном движении, принимает вид:

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} A_{00} & 0 & 0 \\ 0 & A_{i,j} & 0 \\ 0 & 0 & A_{nm} \end{vmatrix}$$

Начальное расположение измерителя концентрации, установленного на БЛА, задается точкой $A(x_0, y_0)$. Процесс поиска ИЗ завершается, если БЛА попадает в окрестность точки $A(x_n, y_n)$ с максимальной концентрацией. Учитывая, что изначально положение точки максимума концентрации $A(x_n, y_n)$ неизвестно, считается наилучшим то направление, в котором целевая функция возрастает быстрее всего. Это направление является градиентом функции $ГK_{CO}$. Составляющие вектора градиента функции $K_{CO} = K_{CO}(x, y)$ являются ее частными производными по соответствующим аргументам:

$$ГK_{CO} = \left(\frac{\partial K_{CO}(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial K_{CO}(x, y)}{\partial y} \right). \quad (8)$$

Таким образом, при поиске максимума концентрации по методу градиента вычисляются составляющие градиента по формулам (7) для начальной точки и делают рабочий шаг в найденном направлении, т.е. осуществляется переход в новую точку с координатами x_1, y_1 :

$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \lambda \frac{\partial K_{CO}(x, y)}{\partial x}, \quad (9)$$

$$y_1^{(1)} = y_1^{(0)} + \lambda \frac{\partial K_{CO}(x, y)}{\partial y}, \quad (10)$$

где λ — постоянный или переменный параметр, определяющий длину рабочего шага.

Для определения градиента, БЛА делает пробные шаги, позволяющие определить целевую функцию $ГK_{CO}$ в дополнительных точках. Так, сделав пробный шаг вдоль положительного направления оси x т.е. перейдя из точки

x_0 в точку x_1 , можно приближенно оценить составляющие градиента функции $ГK_{CO}$ в точке $A(x_0, y_0)$:

$$\frac{\partial K_{CO}(x, y)}{\partial x} = \frac{K_{CO}(x_1, y_1) - K_{CO}(x_0, y_0)}{\Delta x}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial K_{CO}(x, y)}{\partial y} = \frac{K_{CO}(x_1, y_1) - K_{CO}(x_0, y_0)}{\Delta y}. \quad (12)$$

Таким образом, определение координат новой точки $A_1(x_1, y_1)$ осуществляется по формулам:

$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \lambda \frac{K_{CO}(x_1, y_1) - K_{CO}(x_0, y_0)}{\Delta x}, \quad (13)$$

$$y_1^{(1)} = y_1^{(0)} + \lambda \frac{K_{CO}(x_1, y_1) - K_{CO}(x_0, y_0)}{\Delta y}. \quad (14)$$

На второй итерации вычисляют новую точку с координатами x_2, y_2 и определяют компоненты градиента. Таким образом, БЛА совершает движение в пространстве в сторону увеличения концентрации. Процесс определения координат завершается в окрестности точки $A(x_n, y_n)$.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОЙ СРЕДЫ

Создадим модель среды, в которой БЛА будет перемещаться. На рисунке 2 изображена диаграмма равномерного распространения загрязнения в зоне мониторинга. На данной диаграмме представлен уровень изменения концентрации в виде окружностей.

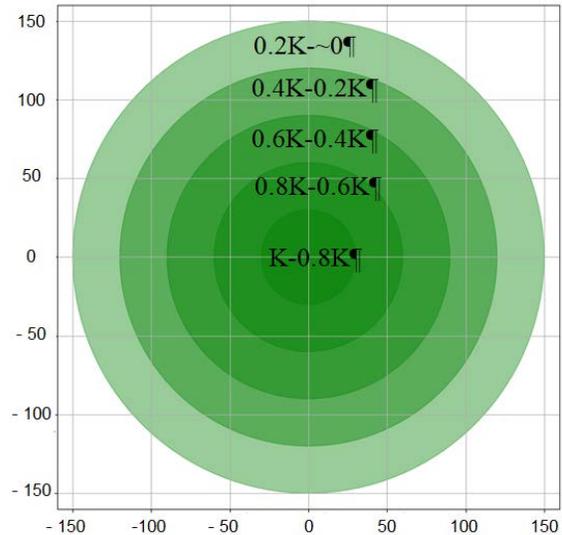


Рис.2 – Диаграмма изменения уровня концентрации загрязняющего вещества в зоне мониторинга

Расчёт концентрации загрязняющего вещества в каждой точке исследуемого пространства осуществляется по следующему принципу:

$$K_{i,j} = R_{зпр} - \sqrt{(x_{зпр} - x_i)^2 + (y_{зпр} - y_j)^2}, \quad (15)$$

где: K_{ij} – Значение концентрации в точке A_{ij} ;

$R_{згр}$ – радиус зоны загрязнения (в метрах);
 $x_{згр}$ – координата загрязнения по x ;
 $y_{згр}$ – координата загрязнения по y ;
 x_i – координата точки A_{ij} по x ;
 y_j – координата точки A_{ij} по y .

V. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САУ

Для реализации автономного полета БЛА в системе РОИЗ разработана система управления, структурная схема которой приведена на рис.3 [17]. Предложенная структура позволяет осуществлять движение БЛА по координатам с возможностью определения концентрации и градиента в заданных точках [18],[19]. Переход от одной точки ЗМ к другой осуществляется на основе анализа информации о концентрации и градиенте.

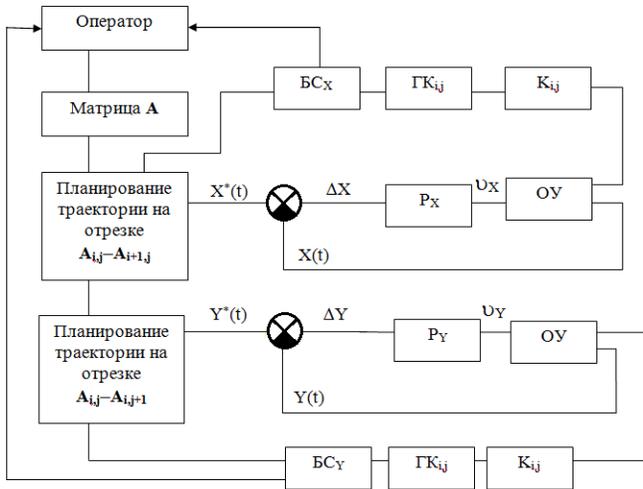


Рис.3. Структурная схема САУ при координатном движении БЛА

Оператор задает компоненты исходной матрицы A . Блок планирования траектории определяет координаты положения следующей точки как по координате Ox , так и по координате Oy , также определяется закон движения по отрезку прямой по формуле (14) в виде зависимостей $X^*(t)$ и $Y^*(t)$. Отклонение реального положения БЛА от заданного определяется в блоках сравнения в виде отклонений ΔX и ΔY . Эта информация используется для расчета управляющих напряжений, поступающих на соответствующие электроприводы, перемещающие БЛА в заданную точку, в которой происходит замер концентрации K_{ij} и определение градиента $ГК_{ij}$. В покоординатных блоках $БС_x$ и $БС_y$ сравнения находится знак градиента, который поступает в блок планирования следующей точки посещения и построения нового отрезка траектории. В качестве объекта управления (ОУ) выступает математическая модель, отражающая движение БЛА вдоль отрезка прямой связывающей точки $A(x_{i-1}, y_{i-1})$, $A(x_i, y_i)$ с учетом внешних возмущений представим в виде:

$$\dot{\bar{q}} = \Phi \bar{q} + B\bar{U} + \bar{W}, \quad (16)$$

где $\bar{q} = (\dot{x}, \dot{y})^T$ – вектор обобщенных скоростей; B – единичная матрица; Φ – матрица параметров сил сопротивления окружающей среды:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 \\ 0 & \mu_y \end{bmatrix}.$$

$$\bar{W} = (W_x, W_y)^T, \quad (17)$$

где W – функция, внешних возмущающих воздействий, определенная на интервале $W_{01} < W_0 < W_{02}$, W_{01} – минимальное значение W_0 ; W_{02} – максимальное значение W_0 .

Вектор управляющих воздействий:

$$\bar{U} = (U_x, U_y)^T. \quad (18)$$

С учетом (17), (18) уравнение (16) будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 \\ 0 & \mu_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \end{bmatrix}. \quad (19)$$

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера применения АПД и АГД для РОИЗ на производственных складских помещениях рассмотрим схему, представленную на рисунке 4. В общем виде на складах (в закрытых помещениях), предназначенных для тарных и штучных грузов, выделяют следующие основные рабочие зоны: 1 – железнодорожная рампа (зона разгрузки); 2 – зона приемки; 3 – зона основного хранения; 3а – стеллажное хранение; 3б – штабельное хранение; 4 – зона комплектации заказа; 5 – автомобильная рампа (зона отгрузки); 6 – экспедиция приемки; 7 – экспедиция отправки; 8 – подсобные и вспомогательные помещения.

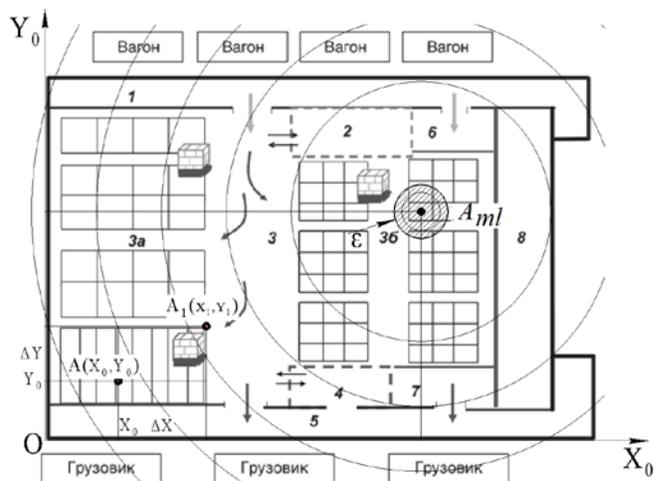


Рис.4 Схема разделения складских помещений на рабочие площади

Рассмотрим движение БЛА в плоскости Oxy в соответствии с алгоритмом последовательного мониторинга (АПМ) окружающей среды. Примем, что по

координате Ox необходимо посетить и произвести замеры концентрации в 20 точках, а по координате Oy – соответственно 20 точек. В этом случае, матрица точек посещения имеет вид:

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{020} \\ A_{i0} & A_{i,j} & A_{i20} \\ A_{200} & A_{20,j} & A_{2020} \end{vmatrix}.$$

Движение происходит последовательно по отрезкам $A_{00} - A_{01} ; A_{01} - A_{02}$ и, далее последний отрезок в первой строке матрицы $A_{19} - A_{20}$. После прохода по точкам первой строки осуществляется переход на вторую строку и так далее. В результате мониторинга получаем двести значений концентрации в различных точках, по которым строится КРК.

Результатом моделирования работы данного алгоритма является график изменения концентрации загрязняющих веществ, в котором точка максимума представляет собой точку с максимальным уровнем концентрации загрязнения, т.е. источник загрязнения (рис. 5). Рисунок 6 иллюстрирует траекторию движения БПЛА по исследуемому алгоритму.

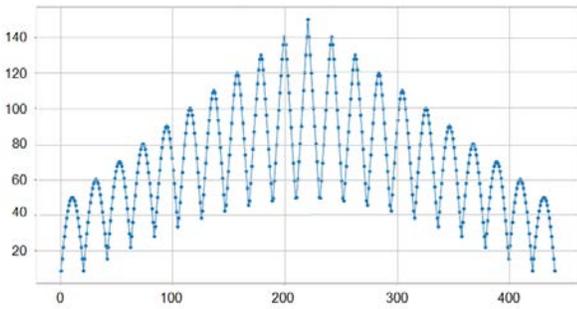


Рис. 5 – График изменения концентрации загрязнения при движении по АПМ

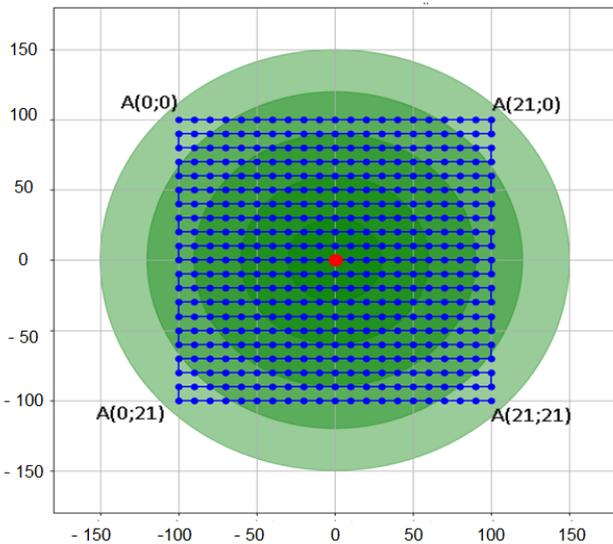


Рис.6 – Траектория движения БПЛА по АПМ

На траектории обозначены координаты начальной $A(0;0)$ и конечной $A(21;21)$ точек движения БЛА, центральная точка - источник возгорания.

Преимуществом данного алгоритма является высокая информативность, достигаемая за счёт большого количества измерений. Однако, непосредственное детектирование источника загрязнения может занять много времени.

Рассмотрим определение координат источника возгорания градиентным методом. Движение БЛА начинается из точки A_{00} вдоль оси Ox в сторону возрастания концентрации. При изменении знака градиента происходит остановка РМУ и переход на движение по координате Oy . Матрица точек посещения при применении АГМ имеет вид:

$$\bar{A} = \begin{vmatrix} A_{00} & 0 & 0 \\ A_{i0} & 0 & 0 \\ A_m & A_{mj} & A_{ml} \end{vmatrix}.$$

Схема движения БЛА по АГД приведена на рисунке 7.

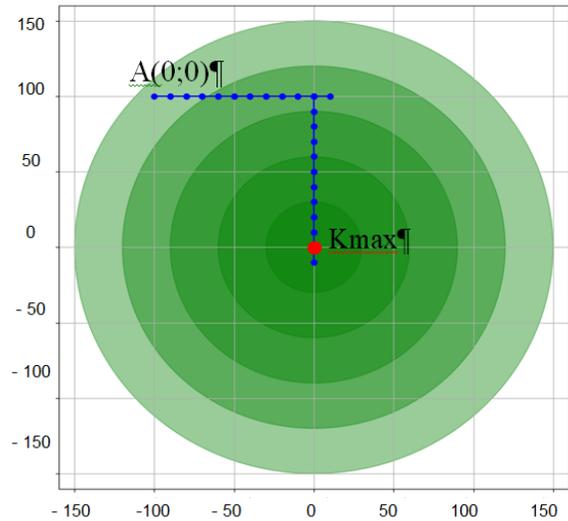


Рис. 7 – Траектория движения БЛА по АГД

БЛА измеряет концентрацию, делает шаг, производит повторный замер и возвращается на исходную позицию. Если концентрация на последующей точке увеличилась, выбранное направление является верным и сохраняется. В противном случае направление инвертируется.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ методов обнаружения источников загрязнения атмосферы вредными веществами типа монооксид углерода CO . Разработана математическая модель, отражающая движение БЛА вдоль отрезка прямой связывающей точки посещения БЛА при мониторинге. Предложены методы определения координат источника возгорания на основе алгоритма последовательного мониторинга объекта и алгоритма градиентного движения.

Сравнительный анализ двух алгоритмов показал, что по быстрдействию метод градиентного движения к источнику возгорания является наиболее эффективным.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Анализ пожаров и их последствий в РФ за 6 месяцев 2022 года. <https://fireman.club/literature/analiz-obstanovki-s-pozharami-i-ih-posledstviyami-na-territorii-rf-za-6-mesyazhev-2022> (дата обращения 15.01.2023).
- [2] Классификация пожаров и факторы. Классы горючих веществ. <https://fireman.club/inseklodepia/fazy-razvitiya-pozhara> (дата обращения 15.01.2023).
- [3] Фазы пожара и сколько их: начальная, основная и конечная. <https://fireman.club/inseklodepia/fazy-razvitiya-pozhara> (дата обращения 15.01.2023).
- [4] S.F. Jatsun, S.V. Efimov, O.V.Emilyanova, A. S. Martinez Leon, "Modeling and control architecture of autonomous mobile aerial platform environmental monitoring", 4 International conference on information systems and computer science-(INCISCOS), Springer, Singapore, 2020, pp. 345-358. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_28.
- [5] Z. Ye, J. Yang, N. Zhong, X. Tu, J. Jia, & J. Wang, "Tackling environmental challenges in pollution controls using artificial intelligence: A review", *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 699, p. 134279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134279>.
- [6] L.T. Tanklevsky, I.A. Babikov; A.L. Tanklevsky, "On the assessment of the reliability of fire detection", *Problems of technosphere risk management*, 2021, no 3 (59), pp.28-33.
- [7] СП 5.13130.2013 СППЗ. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. [https:// docs.cntd.ru/document/1200071148](https://docs.cntd.ru/document/1200071148) (дата обращения: 16.01.2022).
- [8] A.Solórzano, J. Eichmann, L.Fernández, B. Ziems, J. M. Jiménez-Soto, S.Marco, & J. Fonollosa, "Early fire detection based on gas sensor arrays: Multivariate calibration and validation", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 352, part. 1,1 February 2022, 130961. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130961>.
- [9] J. Fonollosa, A. Solórzano, S. Marco, "Chemical sensor systems and associated algorithms for fire detection: A review", *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 553. <https://doi.org/10.3390/s18020553>.
- [10] Y. Li, L. Yu, C. Zheng, Z. Ma, S. Yang, F Song, & F. K. Tittel, "Development and field deployment of a mid-infrared CO and CO2 dual-gas sensor system for early fire detection and location", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, vol.270, p. 120834. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120834>.
- [11] О. В Емельянова, Р.Ю.Роляков, С.В.Ефимов, С.Ф.Яцун. Мобильный летательный комплекс для раннего обнаружения очагов возгорания. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2018, №. 3, с. 136-141.
- [12] S. Feng, F. Farha, Q.Li, Y.Wan, Y. Xu, T. Zhang, & H. Ning, "Review on smart gas sensing technology", *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 17. p. 3760. <https://doi.org/10.3390/s19173760>.
- [13] S.F.Jatsun, N.A. Korenevskiy, S.V. Efimov, E.N. Korovin, "An automated system for monitoring the environment and assessing people's status in extreme situations using a flying robot", *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 52 (4), pp. 287-290.
- [14] S.Jatsun, O.Emelyanova, P.Bezmen, A. M. Leon, & L. A. Mosquera, "A control strategy of a mobile robot in a limited space using a laser rangefinder", *Robots in human life*, pp.376-385. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.20>.
- [15] S.Manfreda, M. F.McCabe, P. E. Miller, R. Lucas, V.Pajuelo Madrigal, G.Mallinis, ... & B. Toth, "On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring", *Remote sensing*, 2018, vol. 10 (4), p. 641. <https://doi.org/10.3390/rs10040641>
- [16] Поляков, Р. Ю. Мобильная приборная платформа для системы экологического мониторинга загрязнения токсичными газами атмосферного воздуха: дис. на соискание научной степени канд. тех. наук / Поляков Роман Юрьевич; Юго-Западный гос.ун-т. Курск, 2019, 165 с. <https://www.dissercat.com/>
- [17] G. Q. Huang, Y. X. Jin, S. Z.Luo, Z. H. Fu, G. E. Wang, & G. Xu, "Cascading Photoelectric Detecting and Chemiresistive Gas Properties of Pb5S2I6 Nanowire Mesh for Multi -Sensing -Factor Accu Alarm", *Small methods*, 2022, vol. 6 (8), p. 2200470.
- [18] H. Wu, L. Dong, X. Yin, A. Sampaolo, P. Patimisco, W. Ma, & S. Jia, "Atmospheric CH4 measurement near a landfill using an ICL-based QEPAS sensor with VT relaxation self-calibration", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 297, pp. 126753. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126753>
- [19] G. Xie, A.Shangguan, R. Fei, W. Ji, W. Ma, & X. Hei, "Motion trajectory prediction based on a CNN-LSTM sequential model", *Science China Information Sciences*, 2020,vol. 63, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11432-019-2761-y>.

Environmental Monitoring Algorithms for Early Prediction of Fire-Hazardous Situations

O.V. Emelyanova, S. V. Efimov, O. B. Kochergin

Abstract—There is a problem of promptly obtaining sufficient information about the chemical situation in the workplace and the territories adjacent to it, necessary and sufficient for taking appropriate measures. A possible solution to this problem, capable of implementing effective and continuous control over the concentration of harmful substances in the air over the entire territory of industrial facilities and adjacent territories, is the creation of a system for monitoring extreme situations using unmanned aerial vehicles. This solution involves the installation of a portable multi-channel gas analyzer on one or more autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs) that move in the monitoring zone, controlling the level of pollution at given points and transmitting information to the decision-making center. Purpose of the study: development of algorithms for searching for the source of atmospheric pollution by the concentration of toxic gas measured by an onboard gas analyzer installed on a mobile instrument platform. An algorithm has been developed to control the autonomous movement of a mobile instrument platform to a source of toxic gas, taking into account the change in concentration and the choice of the type of a given trajectory of movement, which makes it possible to track the change in the dynamics of the concentration of toxic gases in the vicinity of the object of observation.

Keywords—source of air pollution during ignition, analyzer sensors, carbon monoxide, mobile instrument platform

REFERENCES

- [1] Analysis of fires and their consequences in Russia for 6 months of 2022. [Online]. Available at: <https://fireman.club/literature/analiz-obstanovki-s-pozharami-i-ih-posledstviyami-na-territorii-ri-za-6-mesyaczev-2022> (accessed 15 January 2023).
- [2] Classification of fires and factors. Classes of combustible substances. [Online]. Available at: <https://www.flamax.ru/pressroom/articles/vidy-kategorii-i-klassifikatsiya-pozharov> (accessed 15 January 2023).
- [3] Fire phases and how many of them: initial, main and final. [Online] Available at: <https://fireman.club/inseklodepia/fazy-razvitiya-pozhara> (accessed 15 January 2023).
- [4] S.F. Jatsun, S.V. Efimov, O.V.Emilyanova, A. S. Martinez Leon, "Modeling and control architecture of autonomous mobile aerial platform environmental monitoring", 4 International conference on information systems and computer science-(INCISCOS), Springer, Singapore, 2020, pp. 345-358. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_28.
- [5] Z. Ye, J. Yang, N. Zhong, X. Tu, J. Jia, & J. Wang, "Tackling environmental challenges in pollution controls using artificial intelligence: A review", *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 699, p. 134279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134279>.
- [6] L.T. Tanklevsky, I.A. Babikov; A.L. Tanklevsky, "On the assessment of the reliability of fire detection", *Problems of technosphere risk management*, 2021, no 3 (59), pp.28-33.
- [7] SP 5.13130.2013 SPPZ. Systems of fire protection. Automatic fire-extinguishing and alarm systems. Designing and regulations rules. [Online] Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200071148> (accessed 16 January 2023).
- [8] A.Solórzano, J. Eichmann, L.Fernández, B. Ziems, J. M. Jiménez-Soto, S.Marco, & J. Fonollosa, "Early fire detection based on gas sensor arrays: Multivariate calibration and validation", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 352, part. 1,1 February 2022, 130961. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130961>.
- [9] J. Fonollosa, A. Solórzano, S. Marco, "Chemical sensor systems and associated algorithms for fire detection: A review", *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 553. <https://doi.org/10.3390/s18020553>
- [10] Y. Li, L. Yu, C. Zheng, Z. Ma, S. Yang, F Song, & F. K. Tittel, "Development and field deployment of a mid-infrared CO and CO2 dual-gas sensor system for early fire detection and location", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, vol.270, p. 120834. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120834>.
- [11] O. V. Yemelyanova, R.Yu. Polyakov. S.V. Yefimov, S.F. Yatsun, "Mobil flying complex for early detection of focoses of fire fighters", *Fundamental and appliad problems of engineering and technology*, 2018, no 3, pp. 136-141.
- [12] S. Feng, F. Farha, Q.Li, Y.Wan, Y. Xu, T. Zhang, & H. Ning, "Review on smart gas sensing technology", *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 17. p. 3760. <https://doi.org/10.3390/s19173760>.
- [13] S.F.Jatsun, N.A. Korenevskiy, S.V. Efimov, E.N. Korovin, "An automated system for monitoring the environment and assessing people's status in extreme situations using a flying robot", *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 52 (4), pp. 287-290.
- [14] S.Jatsun, O.Emelyanova, P.Bezmen, A. M. Leon, & L. A. Mosquera, "A control strategy of a mobile robot in a limited space using a laser rangefinder", *Robots in human life*, pp.376-385. <https://doi.org/10.13180/clawar.2020.24-26.08.20>.
- [15] S.Manfreda, M. F.McCabe, P. E. Miller, R. Lucas, V.Pajuelo Madrigal, G.Mallinis, ... & B. Toth, "On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring", *Remote sensing*, 2018, vol. 10 (4), p. 641. <https://doi.org/10.3390/rs10040641>
- [16] R. YU. Polyakov, "Mobile instrument platform for the system of environmental monitoring of toxic air pollution". PhD, Tech .sci. diss. Polyakov Roman Yuryevich; The South-West State University. Kursk, 2019, 165 p. <https://www.dissercat.com/>.
- [17] G. Q. Huang, Y. X. Jin, S. Z.Luo, Z. H. Fu, G. E. Wang, & G. Xu, "Cascading Photoelectric Detecting and Chemiresistive Gas Sensing Properties of Pb5S2I6 Nanowire Mesh for Multi-Factor Accurate Fire Alarm", *Small methods*, 2022, vol. 6 (8), p. 2200470.
- [18] H. Wu, L. Dong, X. Yin, A. Sampaolo, P. Patimisco, W. Ma, & S. Jia, "Atmospheric CH4 measurement near a landfill using an ICL-based

QEPAS sensor with VT relaxation self-calibration”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 297, pp. 126753. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126753>

- [19] G. Xie, A. Shangguan, R. Fei, W. Ji, W. Ma, & X. Hei, “Motion trajectory prediction based on a CNN-LSTM sequential model”, *Science China Information Sciences*, 2020, vol. 63, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11432-019-2761-y>.

About Authors

O.V. Emelyanov, Southwestern State University, st. 50 years of October, 94, Kursk, 305040, Russian Federation (e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru).

S.V. Efimov, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Prospect Patriotov, 53, Voronezh, 394065, Russian Federation (e-mail: sclione@ya.ru).

O.B. Kochergin, Southwestern State University, st. 50 years of October, 94, Kursk, 305040, Russian Federation (e-mail: oleg.kochergin01@inbox.ru).