

Модель оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата при фронтальном обследовании промышленных зданий

А.Е. Козлова, О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
55000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является построение математической модели для решения задачи оптимизации траектории полёта летательного аппарата для сбора информации о техническом состоянии зданий и сооружений на опасных производственных объектах. Для решения задачи необходимо определить ограничения, влияющие на полёт, и рассмотреть задачу в четырех условиях: идеальные условия полёта; условия полёта при воздействии погодных факторов; условие полёта при наличии физического препятствия в зоне исследования; условие воздействия погодных факторов и наличие физического препятствия в зоне исследования. Введен критерий эффективности. **Метод.** В основе поиска оптимальной траектории полёта применяется модифицированный алгоритм задачи коммивояжера; учитывается время на ускорение, торможение и зависания летательного аппарата. **Результат.** Предложена математическая модель оптимизации траектории полёта беспилотного летательного аппарата при фронтальном обследовании зданий и сооружений с учетом идеальных и неидеальных условий полёта. **Вывод.** Результатом выполненного исследования является формальное представление задачи по построению оптимальной траектории полёта БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, оптимальная траектория полёта, задача коммивояжера, неидеальные условия полёта, кластеризация, сеансы полёта

Для цитирования: А.Е. Козлова, О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич. Модель оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата при фронтальном обследовании промышленных зданий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026; 53(1):96-107. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-96-107.

The model of the optimal flight path of an unmanned aerial aircraft during a frontal survey of industrial buildings

A.E. Kozlova, O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University,
38 Lenin Ave., Magnitogorsk 455000, Russia

Abstract. Objective. The aim of the research is to build a mathematical model for solving the problem of optimizing the flight path of an aircraft to collect information about the technical condition of buildings and structures at hazardous production facilities. To solve this problem, it is necessary to determine the constraints affecting the flight and consider the problem under four conditions: ideal flight conditions; flight conditions under the influence of weather factors; flight conditions in the presence of a physical obstacle in the research area; and the condition of being affected by weather factors and the presence of a physical obstacle in the research area. An efficiency criterion is also introduced. **Method.** A modified traveling salesman problem algorithm is applied as the basis for finding the optimal flight trajectory, and the time for acceleration, deceleration, and hovering of the aircraft is also taken into account. **Result.** A mathematical model for optimizing the flight trajectory of an unmanned aerial vehicle during the frontal inspection of buildings and structures has been proposed, taking into account both ideal and non-ideal flight

conditions. **Conclusion.** The result of the conducted research is a formal representation of the problem of constructing an optimal flight trajectory for an unmanned aircraft.

Keywords: unmanned aircraft, optimal flight trajectory, traveling salesman problem (TSP), non-ideal flight conditions, clustering, flight sessions

For citation: A.E. Kozlova, O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich. The model of the optimal flight path of an unmanned aerial aircraft during a frontal survey of industrial buildings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):96-107. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-96-107.

Введение. В последние годы наблюдается активное внедрение информационно-технологических средств в различные сферы человеческой жизни. Это привело к увеличению использования новейших технических устройств для сбора информации. Наибольшую популярность для достижения данной цели приобретает использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

БПЛА представляет собой летательный аппарат без экипажа на борту, обладающий разной степенью автономности: от управляемых дистанционно до полностью автоматических [1]. Согласно отчету Федерального агентства воздушного транспорта «Росавиация» общий объем использования БПЛА в экономических сферах составляет: видеопроизводство (реклама, средства массовой информации) – 23%, мониторинг и инфраструктура – 20%, сельское хозяйство – 20%, картография и геодезия – 10%, строительство – 10%, логистика – 7%, спасательные операции – 4%, экология – 4%, мобильная связь – 2% [2]. С помощью БПЛА выполняется сбор и регистрация информации в таких сферах, как: сельское хозяйство [3, 4], медицина [5 - 7], спасательные операции [8, 9], охрана объектов [10, 11], строительство [12-14] и др.

Актуальным является исследование о применении БПЛА для решения задач по сбору информации о техническом состоянии опасных производственных объектов. Так, авторами статьи [15] описан модуль визуализации при обследовании зданий опасных производственных объектов с помощью беспилотного летательного аппарата.

В июне 2022 года данный модуль интегрирован в цифровую платформу системы по интеллектуальной поддержке при оценке технического состояния опасных производственных объектов – «ММК БВС-ОПО».

В рамках работы модуля пользователь (пилот) определяет зоны, для которых должна быть проведена фото- или видеосъемка, и по выбранным зонам выстраивается полётная карта БПЛА (рис. 1).



Рис. 1 – Пример построения полётной карты с помощью модуля визуализации в приложении «ММК БВС-ОПО»

Fig. 1 – Example of building a flight map using the visualization module in the "MMK BVS-OPO" application

Несмотря на автоматизацию процесса построения полётной карты, появляется необходимость её оптимизации с учётом временных затрат, технических характеристик летательного аппарата, полезной площади исследуемого объекта и количества точек для фиксирования информации. Таким образом, основная задача данного исследования заключается в описании метода построения оптимальной траектории полёта БПЛА.

Постановка задачи. Задача по построению оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата классифицируется как задача оптимизации, поскольку рассматривает требования использования минимальных ресурсов на полет квадрокоптера в заданных условиях и при наличии заданных ограничений.

Особенностями задачи является наличие ограничений, которые определены техническими возможностями БПЛА: скорость движения БПЛА; время автономной работы БПЛА в режиме полёта; время остановки БПЛА в точке фиксирования объекта; предельная высота полёта БПЛА; скорость горизонтального полёта БПЛА; максимальная скорость взлёта БПЛА; максимальная скорость снижения БПЛА; максимальная дальность полёта БПЛА. В проекте рассматривается полет БПЛА в четырех условиях:

- условия идеального полета без учета движения атмосферы и непрерывной области обследования;
- условия неидеального полета с учетом погодного воздействия;
- условия полета при наличии областей недоступных для движения аппарата из-за присутствия физических препятствий;
- условия движения аппарат с учетом движения атмосферы и наличия физических препятствий.

Критерием для поиска оптимальной траектории полёта БПЛА является требование: за минимальное количество времени БПЛА должен облететь максимальное количество точек на фасаде исследуемого объекта. Выдвижение этого требования приводит к получению сопутствующих результатов:

- сокращение количества взлетов и посадок БПЛА в ходе обследования одного фасада;
- сокращение количества разбиений непрерывной площади фасада здания на независимые области обследования;
- минимальные затраты энергии на выполнение обследования одного фасада.

Исходными данными решения задачи оптимизации траектории полёта БПЛА при фронтальном обследовании фасадов промышленных зданий являются:

- эталонные изображения фасадов промышленного здания;
- массив точек на изображении фасада здания, используемых для сбора информации о техническом состоянии поверхности;
- технические характеристики БПЛА, указанные в инструкции пользователя и выступающие в качестве ограничений.

Формализация задачи в идеальных условиях. Результат решения задачи оптимизации траектории полета БПЛА представляется в виде полётной карты с визуализацией и описанием оптимальной траектории полёта и прогнозными условиями полета [16]. На полетной карте необходимо указать отклонение от идеальной траектории в зависимости от случайных порывов ветра, его силы и наличия препятствий.

Формализация задачи по построению траектории полёта БПЛА включает четыре варианта:

- вариант 1: формализация задачи для идеальных условий, которые не рассматривают влияние случайных факторов на траекторию полета;
- вариант 2: уточнение формального представления задачи для неидеальных условий, для которых в качестве случайного воздействия на изменение траектории полета рассматривается направление и сила ветра, а также форма области исследования по полезной площади;
- вариант 3: корректировка траектории полёта летательного аппарата при наличии физических препятствий;
- вариант 4: уточнение формального представления задачи с учётом воздействия на движение летательного аппарата направления и силы ветра, а также наличие физических препятствий в зоне исследования.

Анализ ситуации приводит к представлению траектории движения БПЛА в виде ориентированного взвешенного графа. Дуги графа имеют вес и по смыслу обозначают расстояние от одной точки к другой. Для поиска оптимального пути с обходом всех вершин графа возможно использование модифицированного алгоритма решения задачи коммивояжера. Задача коммивояжера заключается в поиске минимального пути между точками графа среди всех допустимых с обходом всех вершин. Длина пути определяется естественным образом – как сумма расстояний между вершинами графа, входящими в маршрут. Таким образом, получаем ситуацию: в плоскости фигуры, сопоставимой с формой фасада здания, задано n точек с координатами. БПЛА за минимальный промежуток времени должен облететь все выбранные точки с минимальным количеством посадок и взлетов.

Для промежутка времени между взлетом и посадкой БПЛА введем понятие «сеанс полета». В рамках каждого сеанса БПЛА может «посетить» все точки выбранной поверхности или только ее части. Особенностью движения БПЛА является совпадение начальной и конечной точки траектории движения. Учитывая, что представленные ограничения зависят от площади, фасад здания стоит разделить на области независимого исследования. Количество областей является неизвестным и формируется по формуле (1):

$$N_k = T_{\text{вд}} / t_{\text{ак}} + 1, \quad (1)$$

где $T_{\text{вд}}$ – время, которое БПЛА тратит на облёт вдоль объекта исследования, двигаясь с минимальной скоростью; $t_{\text{ак}}$ – время работы аккумулятора.

Схема разбиения площади прямоугольного фасада на области исследования при построении оптимальной траектории полёта БПЛА представлена на рис. 2. Схема, приведенная на рис. 2, является частным случаем. В общем случае поверхности фасада имеет произвольную форму.

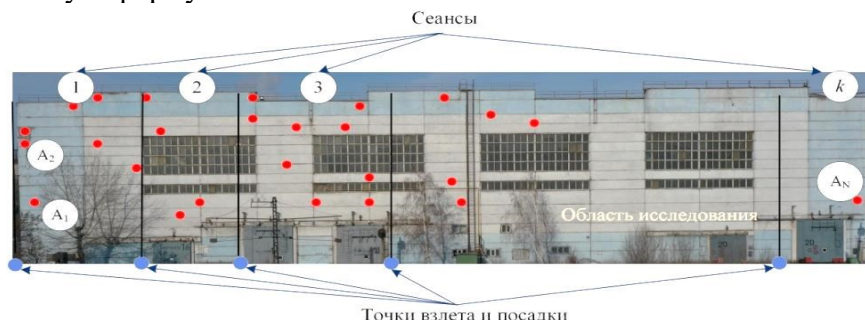


Рис. 2 – Схема разбиения площади прямоугольного фасада на области исследования при построении оптимальной траектории полёта БПЛА

Fig. 2 – Diagram of dividing the area of a rectangular facade into research areas for constructing an optimal UAV flight trajectory

На рис. 2 введены обозначения: A_1, A_2, \dots, A_N – точки исследования, k – номер области исследования. Опираясь на схему разбиения фасада здания, определяются следующие требования к задаче оптимизации:

- количество взлётов и посадок БПЛА должно быть минимальным;
- количество областей исследования должно быть минимальным;
- время на исследование каждой области стремится к минимуму;
- количество используемых электрических аккумуляторов должно быть минимальным.

Определим и формализуем исходные данные задачи:

1) пусть задана произвольная замкнутая область полезной площади исследования D , сопоставимая с формой плоского фасада промышленного здания, и имеющая замкнутую границу L , которая описывается системой уравнений (2):

$$L = L_1|_{[a_0; a_1]} \cup L_2|_{[a_1; a_2]} \cup \dots \cup L_n|_{[a_n; a_0]}, \quad (2)$$

где $L_i|_{[a_{i-1}; a_i]}$ – функция в плоскости фасада, описывающая границу i ; a_0 – абсцисса точки для начала границы L ; n – количество границ, необходимых для описания области;

2) пусть задано неупорядоченное конечное множество A точек для сбора информации, в которых происходит зависание БПЛА на время сбора информации, и принадлежащих области D (3):

$$A = \{A_j(x_j, y_j)\}, \quad (3)$$

где x_j и y_j – координаты заданных точек в выбранной системе координат, связанной с первой точкой взлета; j – номер точки в исходной области D , $j = \overline{1; N}$; N – количество исходных точек.

Схематическое представление исходных данных задачи оптимизации представлено на рис. 3.

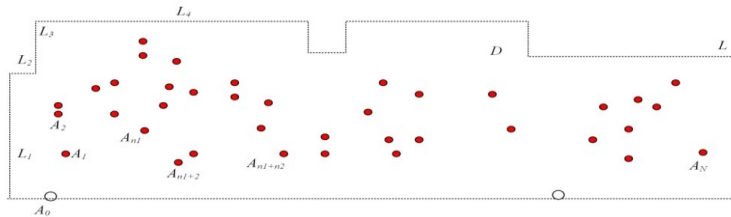


Рис. 3 – Схема задания исходных данных задачи оптимизации траектории полета БПЛА

Fig. 3 – Scheme for setting the initial data of the UAV flight trajectory optimization problem

Для решения задачи требуется: построить кортеж динамических упорядоченных таксонов (кластеров), определяющих порядок обхода (облета) исходных точек (4):

$$B = \|\|B_k(\|\|A_{kj}(x_{kj}, y_{kj})\|\|\|\|, \quad (4)$$

где B_k – таксон с порядковым номером k , $k = \overline{1; K}$; k – количество таксонов, определяемое динамически в ходе решения задачи, и заранее является неизвестным; $\|\|A_{kj}(x_{kj}, y_{kj})\|\|$ – упорядоченный массив исходных точек, входящих в таксон k .

Построенный кортеж B должен удовлетворять условия:

1) расстояние между любыми двумя точками исходного множества определяется по формуле Евклида и определяют вес ребра графа (5):

$$l_j = \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2}, \quad (5)$$

где l_j – расстояние между точками с номерами j и $j - 1$, $j = \overline{1, N}$;

2) каждое ребро графа, определяемое как прямолинейная траектория движения БПЛА, разделяется на три части: участок равноускоренного разгона, участок равномерного движения и участок равноускоренного торможения (рис. 4), где v_k – скорость равномерного движения БПЛА на участке равномерного движения; v_0 – начальная скорость движения БПЛА, при этом $v_0 = 0$;

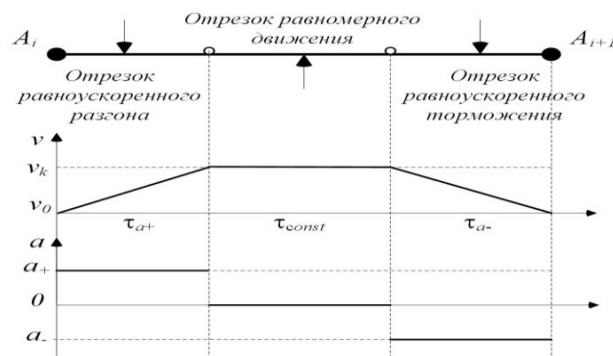


Рис. 4 – Временная структура изменения скорости и ускорения при движении БПЛА между двумя соседними вершинами

Fig. 4 – Temporal structure of velocity and acceleration changes during UAV movement between two adjacent vertices

3) время, затрачиваемое на перелет из точки j в $j + 1$ складывается из четырех частей:

- время, затрачиваемое на ускорение БПЛА – t_{ja+} ;
- время, затрачиваемое на торможение БПЛА – t_{ja-} ;

- время равномерного движения БПЛА – t_{jconst} ;
- время остановки БПЛА в точке фиксирования объекта – t_{js} ;
- 4) итоговое время полета между точками определяется как простая сумма (6):

$$t_j = t_{ja_+} + t_{jconst} + t_{ja_-} + t_{js}. \quad (6)$$

- 5) общее время, затрачиваемое на траекторию внутри кластера (7):

$$T_k = \sum_{j=0}^{n_k} t_{jk}, \quad (7)$$

где t_{jk} – время, затрачиваемое на траекторию между точками j и $j + 1$ внутри кластера k ; n_k – количество точек, вошедших в кластер k ;

- 6) общее время на обследование всего фасада составляет (8):

$$T = \sum_{k=1}^K T_k = \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^{n_k} t_{jk}. \quad (8)$$

При разгоне скорость БПЛА рассчитывается по формуле (9):

$$v_k = 0 + a_+ t_{a_+}, \quad (9)$$

где a_+ – ускорение БПЛА, м/с.

Для того, чтобы рассчитать ускорение БПЛА и время, затраченное на взлёт, необходимо решить систему уравнений. Система уравнений имеет вид (10):

$$\begin{cases} v_k = 0 + a_+ t_{a_+}; \\ \frac{1}{4} l_i = 0 + \frac{a_+ t_{a_+}^2}{2}, \end{cases} \quad (10)$$

где l_i – длина ребра графа между точками с номерами i и $i + 1$.

Решив систему уравнений, получаем формулы для расчета времени и ускорения движения БПЛА (11, 12):

$$t_{a_+} = \frac{l_i}{v_k}, \quad (11)$$

$$a_+ = \frac{v_k}{t_{a_+}} = \frac{l_i}{t_{a_+}^2}. \quad (12)$$

Скорость равномерного движения зависит от характеристик дрона и имеет вид: $v_k = const$.

Аналогичным образом получаем время и ускорение торможения (13, 14):

$$t_{a_-} = \frac{l_i}{v_k}, \quad (13)$$

$$a_- = \frac{v_k}{t_{a_-}} = \frac{l_i}{t_{a_-}^2}. \quad (14)$$

Учитывая введенные обозначения, условия и описание ситуации получили, что множество точек для обследования являются вершинами взвешенного ориентированного графа, для которого требуется построить его динамическое разбиение на упорядоченные таксоны (15):

$$B = \|B_k(\|A_{kj}(x_{kj}, y_{kj})\|)\|, k = \overline{1; K} \text{ и } j = \overline{0; n_k}, \quad (15)$$

и для каждого таксона выполняется критерий (16):

$$T_k = \sum_{j=0}^{n_k} t_{jk} \rightarrow \min, \quad (16)$$

или (17):

$$n_k \rightarrow \max. \quad (17)$$

Для указанных критериев для всего графа формируются критерии: количество упорядоченных таксонов должно быть минимальным (18):

$$K \rightarrow \min. \quad (18)$$

Указанные целевые функции являются взаимосвязанными между собой. Поэтому достаточно найти один из вариантов решения. Открытие нового кластера определяется достижением предельного времени одного сеанса, который зависит от количества точек, включенных в упорядоченную траекторию полета. Эти взаимосвязи определяют особенности методов алгоритмов решения задачи оптимизации: поиска упорядоченных таксонов с максимальным количеством вершин графа (рис. 5).

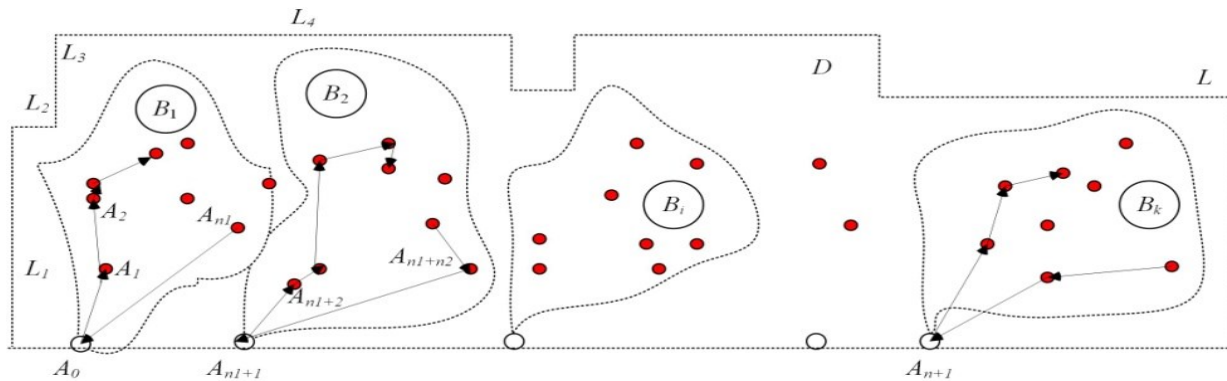


Рис. 5 – Графическая интерпретация искомого решения задачи оптимизации траектории полета БПЛА

Fig. 5 – Graphical interpretation of the sought solution to the UAV flight trajectory optimization problem

На рис. 5 введены обозначения: L_1, L_2, \dots, L_N – замкнутая граница фасада здания, B_1, B_2, \dots, B_k – кортеж динамических упорядоченных таксонов (кластеров), D – область исследования.

Формализация задачи при неидеальных условиях полёта БПЛА. Неидеальными условиями полета БПЛА являются:

- учет возмущающих воздействий при ветреной погоде, тормозящих или ускоряющих движения БПЛА;
- наличие в области исследования фрагментов поверхности, которые являются недоступными для обследования с помощью БПЛА.

При учете возмущающих воздействий при ветреной погоде необходимо учитывать сопротивляемость БПЛА к ветру до определённой его скорости. Так, БПЛА *DJI Mavic PRO* может совершать полёт при максимально допустимой скорости ветра равной 29-38 км/ч. Несмотря на возможность применения БПЛА в ветренную погоду, скорость движения летательного аппарата зависит от скорости ветра и принимает вид (19):

$$\vec{U}_{\text{БПЛА}} = \vec{U}_k + \vec{U}_{\text{ветра}}. \quad (19)$$

Скорость движение БПЛА и движение ветра принимают значения с учетом угла направления. Тем самым проекции скорости БПЛА по оси X и по оси Y принимает вид (20, 21):

$$U_{\text{БПЛА}_X} = U_k \cos \alpha \pm U_{\text{ветра}} \cos \beta, \quad (20)$$

$$U_{\text{БПЛА}_Y} = U_k \sin \alpha \pm U_{\text{ветра}} \sin \beta. \quad (21)$$

Знак определяет направление ветра относительно направлению движения БПЛА.

Также должен быть учтен боковой ветер, при котором БПЛА уходит от направления продольной оси летательного аппарата: влево – при ветре, дующем в левый борт БПЛА, вправо – при ветре, дующем в правый борт.

На рис. 6 показано движение БПЛА в условиях бокового ветра, когда пилот летательного аппарата направил продольную ось БПЛА из точки A в точку B .

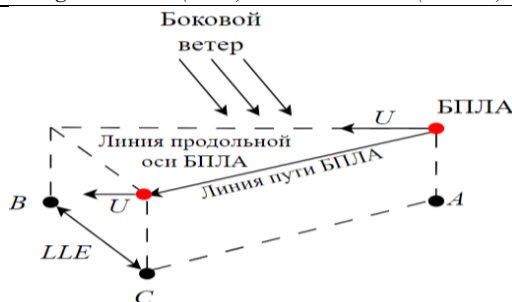


Рис. 6 – Изменение траектории полета БПЛА при боковом ветре
Fig. 6 – Change in the UAV flight trajectory under crosswind conditions

На рис. 6 введены следующие обозначения: A – точка взлета БПЛА; B – заданная точка приземления, C – фактическая точка приземления, U – скорость БПЛА, LLE (*Linear lateral evasion*) – линейное боковое уклонение.

При отсутствии бокового ветра, БПЛА оказался бы над точкой B . БПЛА под действием воздушной скорости перемещается в направлении своей продольной оси, в то время как скорость воздушного течения увлекает его в сторону от этого направления. В результате этого БПЛА совершит движение не по линии своей продольной оси, а по линии фактического пути и окажется над точкой C , уклонившись от линии заданного пути на величину линейного бокового уклонения.

Действительное перемещение БПЛА, участвующего одновременно в двух движениях – вектор воздушной скорости и вектор ветра, направленные под углом друг к другу, происходит по диагонали параллелограмма, построенного на векторах этих движение. Получается навигационный треугольник скоростей (рис. 7).

Сторонами этого треугольника являются векторы воздушной скорости, скорости ветра и путевая скорость. Угол, составленный вектором воздушной скорости и вектором путевой скорости, называется углом сноса DA (*demolition angle*). Если летательный аппарата сносит вправо относительно направления полёта, DA принимает положительное значение, и наоборот.

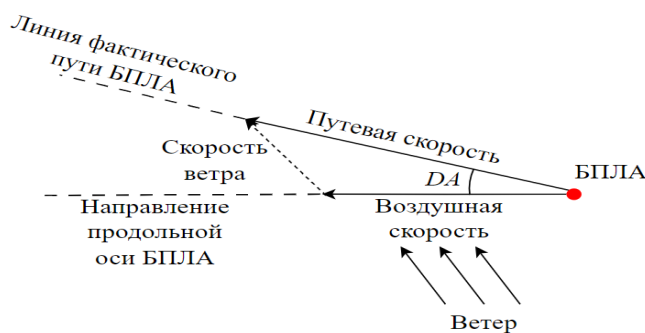


Рис. 7 – Навигационный треугольник скоростей
Fig. 7 – Velocity triangle

Если через основание навигационного треугольника провести меридиану, то получится ряд дополнительных навигационных элементов (рис. 8).

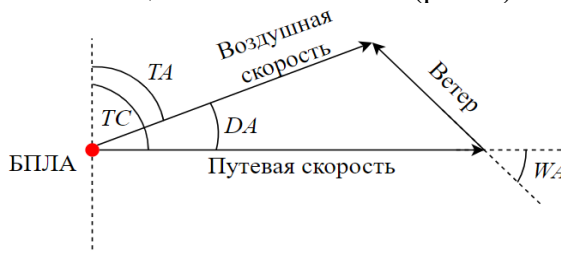


Рис. 8 – Навигационный треугольник скоростей, ориентированный относительно меридианы
Fig. 8 – Velocity triangle oriented relative to the meridian

На рис. 8 введены такие обозначения, как:

– TA (*track angle*) – курс летательного аппарата – это угол, заключенный между северным направлением меридиана, принятого за начало отсчета и продольной осью воздушного судна;

– TC (*true course*) – путевой угол – это угол, заключенный между северным направлением меридиана, принятого за начало отсчета, и линией пути;

– WA (*wind angle*) – угол ветра – угол между линией пути и направлением ветра.
 Для вычисления угла сноса и путевой скорости, необходимо вычислить WA (22):

$$WA = NW - TC, \quad (22)$$

где NW (*navigational wind*) – навигационный ветер, который отличается от метеорологического на 180 градусов и на величину магнитного склонения.

С помощью теоремы синусов получаем формулу угла сноса (23):

$$DA = \arcsin\left(\frac{v_{\text{ветра}} \cdot \sin WA}{v_k}\right). \quad (23)$$

Учет направления и силы ветра для исходных данных означает введение поправки на координаты точек в соответствии с навигационным треугольником (рис. 9).

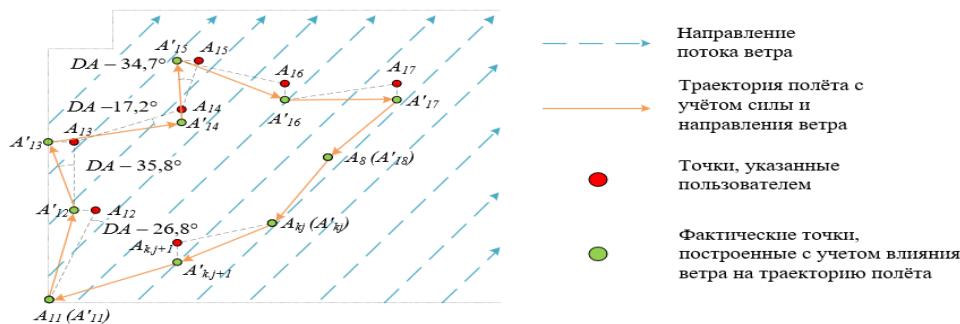


Рис. 9 – Введенные поправки в траектории полёта БПЛА в неблагоприятных условиях в соответствии с расчетом навигационного треугольника и угла сноса
Fig. 9 – Introduced corrections to the UAV flight path in adverse conditions based on the calculation of the velocity triangle and drift angle

На рис. 9 введены обозначения: DA – угол сноса, градусы; $A'_{11}, A'_{12}, \dots, A'_{kj}$ – фактическая точка, построенная с учётом влияние ветра на траекторию полёта летательного аппарата, где k – номер кортежа, j – номер точки в k -ом кортеже.

Кроме того, при построении траектории полёта необходимо учитывать наличие физических препятствий на траектории движения БПЛА, например, кроны деревьев, кустов и другие объекты, которые являются неинформативными для обследования. В данном случае беспилотный летательный аппарат должен обходить препятствия на определенном расстоянии, тем самым, на карте полёта необходимо добавлять вспомогательные точки. При этом БПЛА требуется возвращать в изначальную точку взлёта по кратчайшей траектории полёта с учетом вспомогательных точек (рис. 10 и рис. 11).

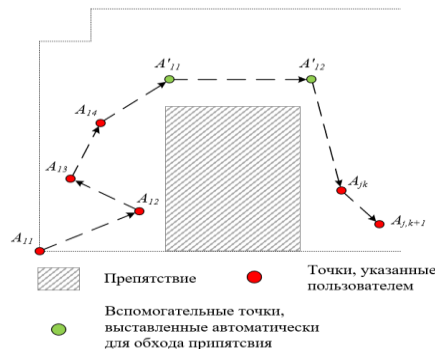


Рис. 10 – Траектория полёта БПЛА с обходом препятствия при учете вспомогательных точек
Fig. 10 – UAV flight path with obstacle avoidance using auxiliary points

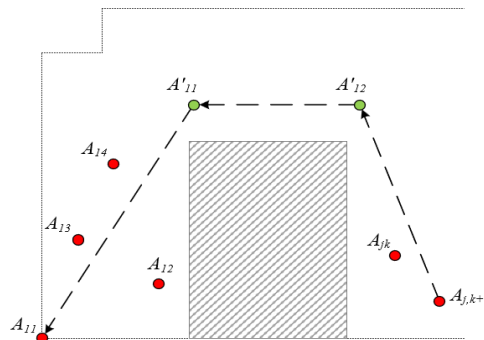


Рис. 11 – Траектория для возвращения БПЛА в точку взлёта
Fig. 11 – Trajectory for the UAV to return to the takeoff point

С учётом дополнительных точек при корректировке траектории полёта летательного аппарата в неблагоприятных погодных условиях и при наличии в зоне исследования препятствий, динамическое разбиение на упорядоченные таксоны принимает вид (24):

$$B = \|B_k(\|A_{kj}(x_{kj}, y_{kj}\|, \|A'_{kj}(x_{kj}, y_{kj}\|)\|, k = \overline{1; K} \text{ и } j = \overline{0; n_k}. \quad (24)$$

Обсуждение результатов. Системы поддержки принятия решений (СППР) представляют собой автоматизированные компьютерные системы, предназначенные для помощи анализе сложных ситуаций и выборе наилучшего решения по множеству критериев. Они применяются в различных сферах, включая бизнес и финансы, энергетику и экологию, логистику и транспорт, а также строительство, где они интегрируются с BIM-технологиями и искусственным интеллектом.

В области мониторинга зданий и сооружений выделяются несколько СППР. SmartBuildings Platform by Johnson Controls использует IoT, машинное обучение и искусственный интеллект (ИИ) для анализа инженерных систем зданий, однако требует высокой стоимости внедрения и качественной IT-инфраструктуры. IBM Maximo for Civil Infrastructure ориентирована на промышленные объекты, применяя IoT-устройства, БПЛА и ИИ для анализа дефектов.

Китайская Baidu AI Construction Monitoring Platform использует ИИ, машинное обучение и компьютерное зрение для выявления дефектов и прогнозирования состояния сооружений, но требует дорогостоящего оборудования и развитой инфраструктуры. Среди российских разработок выделяются СтройКонтроль, СМИС Эксперт и Интеллект-Строй – это системы, адаптированные под отечественные стандарты. Они обеспечивают мониторинг, визуализацию и формирование рекомендаций, однако уступают зарубежным аналогам по точности анализа и глубине применения облачных технологий.

Вышеперечисленные СППР включают в свой функционал возможность сбора графической информации с помощью БПЛА, но не предоставляют инструментов автоматического построения траектории полёта, что ограничивает эффективность обследования зданий и сооружений.

Вывод. 1. Анализ областей применения беспилотных летательных аппаратов показал, что их использование позволяет упростить и автоматизировать круг задач, которые решаются с использованием графической информации и технологий визуализации. Одним из направлений деятельности промышленной безопасности является проведение экспертизы опасных промышленных объектов, при которой производится сбор визуальной информации с применением БПЛА.

2. Опираясь на характеристики БПЛА и ограничения при построении траектории полёта, поставлена задача по построению оптимальной траектории движения летательного аппарата для сбора информации о техническом состоянии опасных производственных объектов. Формализация данной задачи рассматривается в четырех ситуациях: идеальные условия, влияние на полёт летательного аппарата неблагоприятных погодных условий, наличие в зоне исследования препятствия, влияние на БПЛА неблагоприятных погодных условий и наличие препятствий.

3. Для построения траектории полёта БПЛА при неблагоприятных условиях и наличии препятствий вводятся дополнительные точки в исходный массив. Эти «новые» точки включаются в траекторию полета и увеличивают время на обследование. При построении алгоритма движения БПЛА по оптимальной траектории желательным условием является исключение этих точек из выстраиваемых кластеров. Унифицированной будет считаться траектория полета БПЛА, в которой учтены и воздействия ветра, и дополнительные точки, позволяющие получить доступ на всю полезную площадь обследования.

4. Результатом выполненного исследования является формальное представление задачи по построению оптимальной траектории полёта БПЛА для сбора информации о техническом состоянии опасного производственного объекта.

Библиографический список:

1. Василин Н.Я. Беспилотные летательные аппараты. М. : Попурри, 2007, С. 98-105.
2. Состоялось заседание общественного совета при Федеральном агентстве воздушного транспорта с повесткой «Беспилотные авиационные системы. Развитие, управление и регулирование данного вида гражданской авиации» [Электронный ресурс] // Министерство транспорта Российской Федерации. Федеральное агентство воздушного транспорта : [сайт]. [2018]. URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=4393> (дата обращения: 15.10.2025).
3. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чашин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. № 2. 2019. С. 47-51. DOI 10.7242/2658-705X/2019.2.5.
4. Kim J., Kim S., Ju C., Son H. Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications // IEEE Access. 2019. С. 1-17. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
5. Рославцева С.А., Жулев А.И. Перспектива применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для целей медицинской дезинсекции // Национальные приоритеты России. № 3 (42). 2021. С. 250-252.
6. Laksham K.B. Unmanned aerial vehicle (drones) in public health: A SWOT analysis // Family Medicine and Primary Care. 2019. pp. 342-346. DOI 10.4103/jfmpe.jfmpe.413.18.
7. Thiels C., Aho J., Zietlow S., Jenkins D. Use of Unmanned Aerial Vehicles for Medical Product Transport // Air Medical Journal. 2014. pp. 104-106. DOI 10.1016/j.amj.2014.10.011.
8. Polka M., Ptak S., Kuziora L. The Use of UAV's for Search and Rescue Operations // Procedia Engineering, 12th international scientific conference of young scientists on sus-tainable, modern and safe transport. № 192. 2017. pp. 748-752. DOI 10.1016/j.proeng.2017.06.129.
9. Abhijith V., Parvathy B., Vismaya Dev G.H., Unnikrishnan R.S., Praveen K.R., Vivek A. Unmanned Aerial Vehicle for Search and Rescue Mission // 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). 2020. pp. 684-687. DOI 10.1109/ICOEI48184.2020.9143062.
10. Жаринов Д.А. О возможности применения беспилотных летательных аппаратов для охраны военных аэродромов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. № 5. 2018. С. 54-59.
11. Blistanova M., Blistan P. Support for Protection of the Large Object Using UAVs // Advances in Military Technology. № 11. 2017. pp. 227-237. DOI 10.3849/aimt.01159.
12. Носков И.В., Носков К.И., Тиненская С.В. Дрон-технологии в строительстве – современные решения и возможности // Вестник евразийской науки. № 5. 2020. С. 27.
13. Volkan A., Ulubeyli S., Kazaz A. Unmanned aerial vehicles in the construction industry: applications and implications // 4th International Conference Energy & Engineering Congress. 2019. pp. 490-500.
14. Tatum M.C., Lui J. Unmanned Aircraft System Applications in Construction // Procedia Engineering. Creative Construction Conference. № 196. 2017. pp. 167-175. DOI 10.1016/j.proeng.2017.07.187.
15. Элементы визуализации при обследовании опасных производственных объектов с использованием беспилотного летательного аппарата / Козлова А.Е., Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Шахмаева К.Е. // Научная визуализация. 2023. Т. 15. № 2. С. 113-124. DOI 10.26583/sv.15.2.10. EDN NLDVKD.
16. Интеллектуальная система принятия решений при оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах: определение траектории движения беспилотного летательного аппарата / Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Калитаев А.Н., Суровцов М.М., Луганская Д.А., Чернышева А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. № 1, Т. 20. С. 50-60. DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60.

References:

1. Vasilin, N.Ya. Unmanned Aerial Vehicles. Moscow: Popurri. 2007; 98-105. (In Russ).
2. Meeting of the Public Council at the Federal Air Transport Agency on the agenda "Unmanned Aircraft Systems. Development, Management and Regulation of this Type of Civil Aviation" [Electronic resource]. (2018). Ministry of Transport of the Russian Federation. Federal Air Transport Agency: [website]. Retrieved 15.10.2025. – URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=4393>. (In Russ).

3. Zubarev, Yu.N., Fomin, D.S., Chashchin, A.N., & Zabolotnova, M.V. The Use of Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*, 2019;(2),47-51. DOI 10.7242/2658-705X/2019.2.5. (In Russ)
4. Kim, J., Kim, S., Ju, C., & Son, H. Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications. *IEEE Access*, 2019: 7, 1-17. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
5. Roslavtseva, S.A., & Zhulev, A.I. Prospects for the Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Medical Disinfection. *National Priorities of Russia*, 2021;3(42), 250-252. (In Russ).
6. Laksham, K.B. Unmanned aerial vehicle (drones) in public health: A SWOT analysis. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 2019; 8(2), 342-346. DOI 10.4103/jfmprc.jfmprc.413.18.
7. Thiels, C., Aho, J., Zietlow, S., & Jenkins, D. (2015). Use of Unmanned Aerial Vehicles for Medical Product Transport. *Air Medical Journal*, 34(2), 104-108. DOI 10.1016/j.amj.2014.10.011.
8. Polka, M., Ptak, S., & Kuziora, L. (2017). The Use of UAV's for Search and Rescue Operations. *Procedia Engineering*, 192, 748-752. DOI 10.1016/j.proeng.2017.06.129.
9. Abhijith, V., Parvathy, B., Vismaya Dev, G.H., Unnikrishnan, R.S., Praveen, K.R., & Vivek, A. (2020). Unmanned Aerial Vehicle for Search and Rescue Mission. In 2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI) (pp. 684-687). IEEE. DOI 10.1109/ICOEI48184.2020.9143062.
10. Zharinov, D.A. On the Possibility of Using Unmanned Aerial Vehicles for the Protection of Military Airfields. *Aerospace Forces. Theory and Practice*, 2018;(5), 54-59. (In Russ).
11. Blistanova, M., & Blistan, P. Support for Protection of the Large Object Using UAVs. *Advances in Military Technology*, 2017; 11(2), 227-237. DOI 10.3849/aimt.01159.
12. Noskov, I.V., Noskov, K.I., & Tinenskaya, S.V. (2020). Drone Technologies in Construction – Modern Solutions and Opportunities. *The Bulletin of Eurasian Science*, (5), 27. (In Russ)
13. Volkan, A., Ulubeyli, S., & Kazaz, A. Unmanned aerial vehicles in the construction industry: applications and implications. In 4th International Conference on Energy & Engineering Congress . 2019;. 490-500.
14. Tatum, M.C., & Lui, J. Unmanned Aircraft System Applications in Construction. *Procedia Engineering*, 2017; 196, 167-175. DOI 10.1016/j.proeng.2017.07.187.
15. Kozlova, A.E., Narkevich, M.Yu., Logunova, O.S., & Shakhmaeva, K.E. Visualization Elements in the Inspection of Hazardous Production Facilities Using Unmanned Aerial Vehicles. *Scientific Visualization*, 2023; 15(2), 113-124. <https://doi.org/10.26583/sv.15.2.10> (In Russ).
16. Narkevich, M.Yu., Logunova, O.S., Kornienko, V.D., Kalitaev, A.N., Surovtsov, M.M., Luganskaya, D.A., & Chernysheva, A.S. An Intelligent Decision-Making System for Assessing the Quality of Buildings and Structures at Hazardous Production Facilities: Determining the Unmanned Aerial Vehicle Flight Path. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2022; 20(1), 50-60. DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60 (In Russ).

Сведения об авторах:

Козлова Анна Евгеньевна, аспирант кафедры вычислительной техники и программирования; kozlova-ann99@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3109-2185

Логунова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования; logunova66@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7006-8639

Наркевич Михаил Юрьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства; narkevich_mu@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6608-8293

Information about authors:

Anna Ev. Kozlova, Postgraduate student, Department of Computer Science and Programming; kozlova-ann99@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3109-2185

Oksana S. Logunova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Computer Science and Programming; logunova66@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7006-8639

Mikhail Yu. Narkevich, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Industrial and Civil Construction; narkevich_mu@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6608-8293

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 03.11.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 16.12.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 25.01.2026.