

Для цитирования: Кузнецов И.Е., Мельников А.В., Rogozin E.A., Strashko O.V. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 125-139. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139

For citation: Kuznetsov I.E., Melnikov A.V., Rogozin E.A., Strashko O.V. Methodology for accounting the influence of meteorological factors on the efficiency of application of unmanned aerial vehicles on the basis of system analysis. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 125-139. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 551.501.81-623.746

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139

МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Кузнецов И.Е.⁴, Мельников А.В.², Rogozin E.A.¹, Strashko O.V.³

¹Воронежский институт МВД России,

¹394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

²⁻⁴Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина,

²⁻⁴394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, Россия,

¹e-mail: evgenirogozin@yandex.ru, ²e-mail: alexei.melnikov90@yandex.ru

³e-mail: strashko57@yandex.ru, ⁴e-mail: vaiumet@mail.ru

Резюме: Цель. Целью исследования является повышение эффективности применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях влияния дестабилизирующих факторов, обусловленных метеорологическими причинами, на основе выявления связей и закономерностей их функционирования в сложных погодных условиях. **Метод.** Применены методы системного анализа, математического моделирования атмосферных явлений и процессов, теории вероятности и статистического оценивания. **Результат.** Проведён анализ открытых литературных источников по вопросам эксплуатации и практического применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях воздействий факторов внешней среды. Приведена классификация дестабилизирующих воздействий (ДВ), влияющих на выполнение полетного задания БЛА. Обоснован динамический вероятностный показатель «временная эффективность выполнения полетного задания БЛА», характеризующий динамику функционирования БЛА как сложную техническую систему. Разработана методика оценки динамического показателя эффективности функционирования БЛА при выполнении полетного задания (ПЗ) в условиях ДВ, на основе применения вероятностной модели конфликтного взаимодействия между БЛА и ДВ. Приведены стратегии выбора траектории облета локальных зон, в которых на БЛА могут повлиять ДВ. Для оценки интенсивности ДВ и определения размеров зоны локальных возмущений предложена математическая модель. Использование методов теории конфликта в процессе построения модели функционирования БЛА позволило разработать адекватные модели анализа и оценки динамического показателя эффективности функционирования БЛА при выполнении полетного задания в условиях ДВ, а также выявить закономерности влияния метеорологических факторов на эффективность БЛА. **Вывод.** Предложенная методика позволяет повысить эффективность применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в сложных метеорологических условиях по временному показателю на 20-30 % по сравнению с традиционными подходами.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, дестабилизирующее воздействие, продолжительность полета, эффективность функционирования, погодные явления

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

METHODOLOGY FOR ACCOUNTING THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON
THE EFFICIENCY OF APPLICATION OF UNMANNED AERIAL
VEHICLES ON THE BASIS OF SYSTEM ANALYSIS

Ilya E. Kuznetsov⁴, Aleksey V. Melnikov², Evgenii A. Rogozin¹, Oleg V. Strashko³,

¹*Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,*

¹*53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia,*

²⁻⁴*Military Educational and Scientific Center of the Air Force
named after N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin,*

²⁻⁴*54A Starykh Bolshevikov Str., Voronezh 394064, Russia,*

¹*e-mail: evgenirogozin@yandex.ru, ²e-mail: alexei.melnikov90@yandex.ru*

³*e-mail: strashko57@yandex.ru, ⁴e-mail: vaiumet@mail.ru*

Abstract Objectives The aim of the study is to increase the effectiveness of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the context of destabilising meteorological factors on the basis of an identification of links and patterns of unmanned aerial vehicles operating in difficult weather conditions. **Methods** In this work, in order to account for the effect of meteorological factors on the effectiveness of unmanned aerial vehicles, the methods of system analysis, mathematical modelling of atmospheric phenomena and processes, as well as probability theory and statistical assessment, were applied. **Result** An analysis of open literature sources devoted to the issues of operation and practical application of unmanned aerial vehicles (UAVs) under the influence of environmental factors was carried out. A classification of destabilising influences (DI) affecting the performance of a UAV flight mission is developed and presented. The dynamic probabilistic indicator, which, in characterising the dynamics of UAV functions as a complex technical system is referred to as “time efficiency of the UAV flight mission”, is substantiated. A methodology for estimating the dynamic efficiency indicator of the UAV’s functionality during the performance of a flight mission (FM) under DI conditions is developed on the basis of a probabilistic model of the conflicting interaction between UAV and DI. Strategies for selecting the trajectories of flights around local zones in which UAVs can be influenced by DI are given. To estimate the DI intensity and determine the size of the local disturbance zone, a mathematical model is proposed, whose application makes it possible to improve the UAV functioning under complex meteorological conditions (CMC) by taking into account the information on the space-time variability of dangerous for UAV weather-related phenomena (DWP). In the process of constructing the UAV functioning model, the use of conflict theory methods permitted adequate models for the analysis and evaluation of the dynamic efficiency indicator of the UAV functioning during the performance of FM in DI conditions to be developed, as well as the patterns of meteorological factors influencing the effectiveness of the UAV application to be revealed. **Conclusion** The methodology proposed in the article makes it possible to increase the effectiveness of unmanned aerial vehicles (UAVs) under complex meteorological conditions by a time index of 20-30% as compared with traditional approaches.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, UAV, destabilising influence, flight duration, operational efficiency, weather phenomena*

Введение. Сфера применения БЛА в настоящее время охватывает практически все виды человеческой деятельности. Долгое время БЛА разрабатывались исключительно для нужд армии – разведки, целеуказания, постановки помех, нанесения точечных ударов по объектам противника, и т.д. Применение БЛА в гражданских целях также позволяет выполнять различные задачи. Обеспечение безопасности мест массового скопления людей, патрулирование улиц, охрана объектов. МЧС России широко использует БЛА для разведки и патрулирования при пожарах, наводнениях и других ЧС. Аэрофотосъемка с использованием БЛА применяется при изучении труднодоступных геологических тел. Осуществляется мониторинг нефтегазовых тру-

бопроводов, линий электропередач, дорожных покрытий.

Применение БЛА для решения перечисленных задач сопровождается рядом ограничений, накладываемых на систему управления (СУ) полетом, в особенности, если речь идет об использовании БЛА, выполняющих ПЗ в автономном режиме. Влияние факторов внешней среды на БЛА может существенно снизить качество выполнения ПЗ, а при определенных значениях параметров ДВ может и вовсе исключить возможность применения БЛА.

Анализ открытых литературных источников и нормативных документов МЧС России, Минтранса РФ показал [1-9], что решение задач, связанных с сохранением эффективного функционирования БЛА в различных климатических условиях является важным этапом при составлении требований к бортовому оборудованию БЛА, обеспечивающему безопасность полетов в аварийных ситуациях, возникающих под действием различных погодных явлений. Методы решения данных задач также необходимо учитывать при разработке автономной СУ БЛА, обеспечивающей перемещение БЛА по заданной траектории.

Постановка задачи. Для разработки методики оценки динамического показателя эффективности функционирования БЛА при выполнении ПЗ, включающей в свой состав математическую модель и алгоритм конфликтного взаимодействия БЛА и ДВ необходимо:

1. Разработать на основе анализа открытых литературных источников классификационную схему ДВ, влияющих на выполнение ПЗ БЛА;

2. Разработать структурно-логическую модель конфликтного взаимодействия БЛА и ДВ при выполнении ПЗ;

3. Обосновать и разработать динамический показатель эффективности функционирования БЛА в условиях ДВ;

4. На основе разработанного показателя эффективности составить набор стратегий – управляющих воздействий по корректировке траектории полета при возникновении ДВ на эшелоне полета БЛА;

5. Разработать математическую модель для получения прогностических значений метеорологических величин, оказывающих влияние на полет БЛА.

Метод исследования. С целью решения вышеуказанных научных задач необходимо использовать и практически применить методы системного анализа, математического моделирования атмосферных явлений и процессов, теории вероятности и статистического оценивания. В процессе функционирования БЛА выделяют три сложных этапа полета: полет к зоне выполнения ПЗ, выполнение ПЗ, возвращение на стартовую площадку. Первый этап включает в себя взлет, набор высоты, выход в заданный эшелон полета и собственно полет к зоне выполнения ПЗ. На втором этапе происходит снижение БЛА до определенной высоты, на которой будет происходить выполнение ПЗ. На третьем этапе также происходит набор высоты и возвращение на стартовую площадку на заданном эшелоне, а также посадка.

На всех перечисленных этапах полета БЛА должен лететь по строго намеченному курсу, с наименьшими отклонениями от заданной траектории. Отклонение от заданной траектории может иметь допустимые граничные значения, которые задаются исходя из ГТХ БЛА. В тоже время, на БЛА может быть оказано ДВ, которое выведет его за пределы допустимой зоны отклонения. В этом случае СУ БЛА должна принять меры по возвращению БЛА на заданную траекторию полета. От того насколько быстро БЛА будет возвращен на заданную траекторию будет зависеть эффективность его применения. Продолжительность полета БЛА является одним из показателей эффективности его применения.

Источники ДВ могут быть природного и техногенного характера и могут оказывать неблагоприятное воздействие на СУ БЛА, обеспечивающую перемещение по заданной траектории. Анализ открытых литературных источников [7-14] позволяет составить классификацию ДВ, оказывающих неблагоприятное влияние на БЛА в ходе выполнения ПЗ, которая представлена на рис. 1.

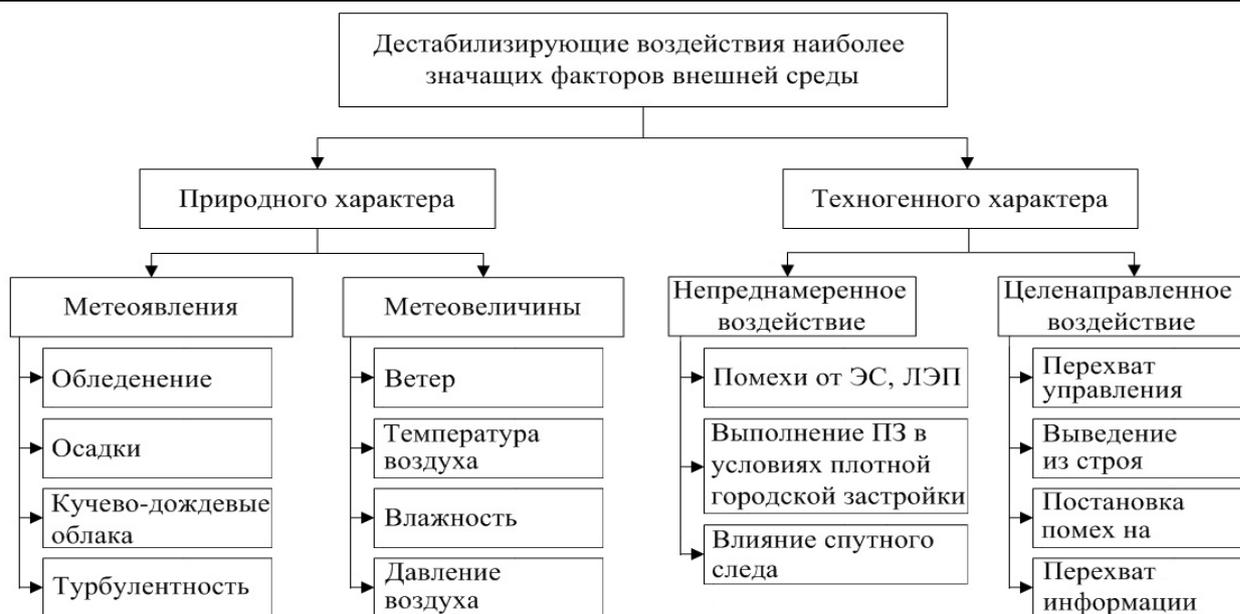


Рис.1.Классификация дестабилизирующих воздействий
Fig. 1. Classification of destabilizing effects

Как видно из приведенной классификации, БЛА в ходе своего функционирования подвергается различным ДВ. Из приведенной на рис.1 классификации, будем рассматривать ДВ природного происхождения, которые оказывают наибольшее влияние на изменение траектории полета БЛА. Последовательность и содержание действий оператора БЛА, либо СУ БЛА при организации автономного полета, на различных этапах возникновения ДВ разработаны на основе правил управления БЛА в условиях влияния ДВ [17].

Для математического описания и исследования подобных задач используется модель динамического конфликта [15], которая в сочетании с теорией случайных процессов позволяет разрабатывать математические модели динамики функционирования сложных иерархических систем, отвечающие требованиям по адекватности и точности получаемых результатов.

Для описания динамики влияния ДВ на функционирование БЛА, целесообразно использовать методы полумарковских процессов [16], которые позволяют получить наиболее адекватные модели случайных процессов с последствием и произвольными законами распределения переходных характеристик.

В соответствии с технологией использования методов динамического конфликта и теории полумарковских процессов [15-16], разработка аналитических моделей реальных процессов осуществляется в три этапа:

1. Разработка структурно-логической модели исследуемого процесса, отражающей его наиболее существенные с точки зрения решаемых исследовательских задач стороны.

2. Разработка динамического графа случайного полумарковского процесса, эквивалентного вербальной модели, а также исходной системы интегро-дифференциальных уравнений, описывающей обусловленные плотности распределения вероятности (ПРВ) перехода процесса из начального в конечные состояния.

3. Выбор табулированных ПРВ, наиболее точно аппроксимирующих вероятностно-временные характеристики (ВВХ) моделируемых процессов и разработка способа вычисления выходного показателя по исходной системе интегро-дифференциальных уравнений.

В данной статье подробно рассмотрим реализацию первого этапа.

Структурно-логическая модель динамического конфликта между ДВ и СУ БЛА, описывающая динамику влияния ДВ на функционирование БЛА, представлена на рис.2.

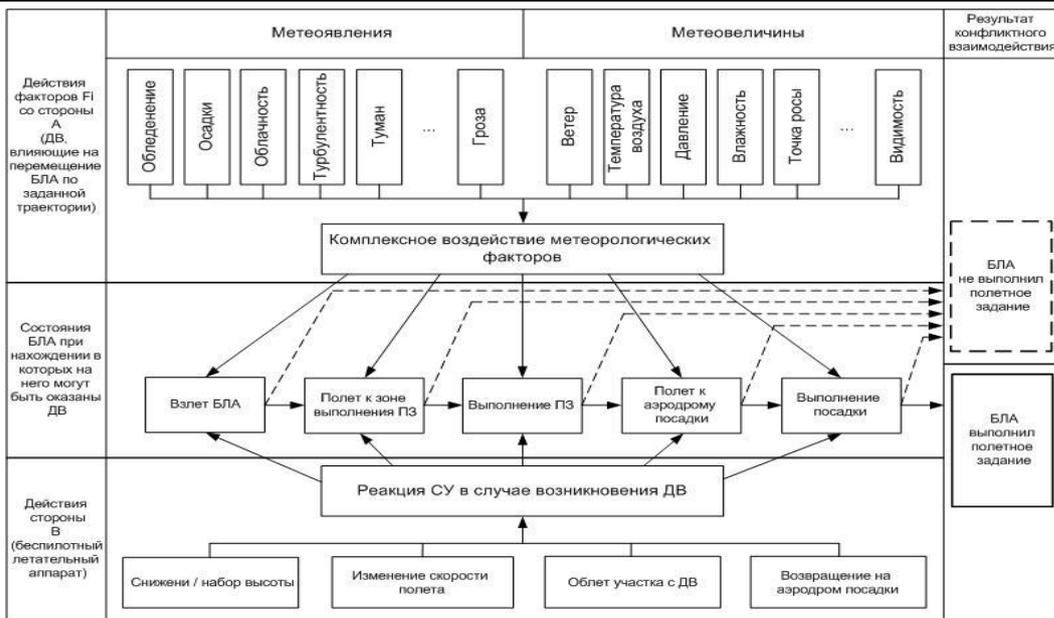


Рис. 2. Структурно-логическая модель конфликтного взаимодействия беспилотных летательных аппаратов – факторы внешней среды

Fig. 2. Structural and logical model of conflict interaction of unmanned aerial vehicles - environmental factors

Как известно из теории эффективности технических систем [18], показатель эффективности операции есть мера степени соответствия реального результата операции требуемому. Основным требованием при выборе показателя эффективности является соответствие показателя цели операции, которая отображается требуемым результатом.

В нашем случае основным требованием к БЛА является доставка полезной нагрузки до места выполнения ПЗ и возвращения на стартовую площадку в условиях влияния ДВ за минимальное (рассчитанное) время. На преодоление ДВ затрачиваются внутренние энергетические ресурсы, что сокращает время нахождения БЛА в полете. Соответственно эффективность функционирования БЛА во времени будет изменяться, рис. 3.

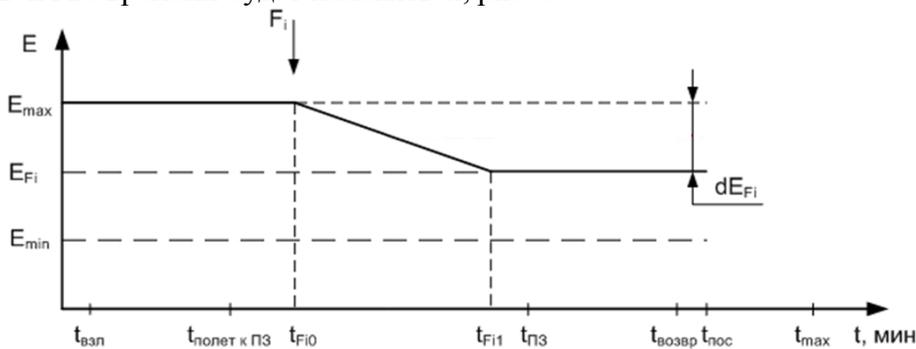


Рис. 3. График изменения эффективности функционирования беспилотных летательных аппаратов под влиянием дестабилизирующих воздействий факторов внешней среды
Fig. 3. Graph of changes in the performance of unmanned aerial vehicles under the influence of the destabilizing effects of environmental factors

Максимальное значение эффективности функционирования БЛА – E_{max} будет сохраняться до момента появления ДВ, и достигнет значения E_{Fi} после воздействия i -го фактора внешней среды F_i . Если эффективность функционирования БЛА опустится ниже минимального значения E_{min} , то можно говорить о том, что БЛА не выполнит ПЗ, так как заданное время выполнения ПЗ $t_{зад}$, превысит максимальное допустимое время нахождения в полете t_{max} (обусловлено тактико-техническими характеристиками (ТТХ) БЛА).

После того как СУ отработает ДВ, эффективность функционирования БЛА выходит на новое устоявшееся значение, которое отличается от E_{\max} на величину dE_{Fi} .

Общее время выполнения ПЗ $t_{зад}$, рассчитывается по формуле:

$$t_{зад} = t_{взл} + t_{полет\ к\ ПЗ} + t_{ПЗ} + t_{возвр} + t_{нос}, \quad (1)$$

где: $t_{взл}$ – взлет БЛА; $t_{полет\ к\ ПЗ}$ – полет к зоне выполнения ПЗ; $t_{ПЗ}$ – выполнение ПЗ; $t_{возвр}$ – время возвращения на стартовую площадку; $t_{нос}$ – посадка БЛА.

В качестве основы для составления показателя эффективности функционирования БЛА будем использовать время $t_{ДВ}$, в течение которого на БЛА оказывалось ДВ:

$$t_{ДВ} = \sum_{i=1}^n (t_{Fi1} - t_{Fi0}), \quad (2)$$

где: t_{Fi0} – время начала влияния ДВ; t_{Fi1} – время окончания отработки ДВ.

В результате влияния ДВ БЛА может быть выведен за пределы заданной траектории полета. Задача СУ, заключающаяся в поддержке заданного курса БЛА, считается выполненной, если величина $t_{ДВ}$ не превышает некоторой максимально допустимой величины $t_{резерв}$:

$$t_{резерв} = t_{\max} - t_{зад}. \quad (3)$$

Поскольку $t_{ДВ}$ и $t_{резерв}$ в общем случае являются случайными величинами, в качестве показателя эффективности функционирования БЛА будем использовать вероятность того, что время нахождения БЛА под влиянием ДВ не превысит резервного времени нахождения в полете:

$$E = P(t_{ДВ} \leq t_{резерв}). \quad (4)$$

Данный показатель является количественной оценкой, отражающей вероятность возникновения неблагоприятных погодных условий и относительной оперативности решения своих задач СУ БЛА. Вместе с этим необходимо учитывать интенсивность ДВ.

Таким образом, время нахождения БЛА под влиянием ДВ зависит от фактора внешней среды F_i и его интенсивности I_i . Интенсивность ДВ определяется по предварительному метеорологическому прогнозу. Если на БЛА оказывается влияние нескольких факторов внешней среды F_i одновременно, СУ начинает обрабатывать с того фактора, который действует с максимальной интенсивностью F_{\max} :

$$F_{\max} = \max\{F_i\}. \quad (5)$$

Одним из факторов внешней среды F_i , оказывающих непосредственное влияние на эффективность функционирования как самого БЛА, так и установленной на его борту аппаратуры являются погодные условия. Анализ технических характеристик БЛА показал, что по метеорологическим условиям в процессе эксплуатации имеется ряд ограничений, представленных в табл.1. При этом интенсивность дестабилизирующего воздействия I_i зависит от степени гидрометеорологических условий.

Таблица 1. Интенсивность дестабилизирующего воздействия, влияющего на беспилотный летательный аппарат и его целевую нагрузку в зависимости от степени гидрометеорологических условий

Table 1. The intensity of the destabilizing effect affecting the unmanned aerial vehicle and its target load, depending on the degree of hydrometeorological conditions

Метеорологические факторы дестабилизирующих воздействий	Интенсивность I_i		
	Слабая, I_1	Умеренная, I_2	Сильная, I_3
Высота нижней границы облачности (F_1)	1000-1500 м	500 – 1000 м	Менее 500 м
Метеорологическая дальность видимости (F_2)	6 – 10 км	1 – 5 км	Менее 1 км
Скорость ветра (F_3)	до 10м/с	10 – 15м/с	Более 15 м/с
Явления погоды (гроза, обледенение, болтанка БЛА) (F_4)	Слабой интенсивности	Умеренной интенсивности	Сильной интенсивности

В случае возникновения ДВ на маршруте полета БЛА, рассчитанная траектория полета $h1$ между точками А и В должна быть скорректирована, рис.4.

В отсутствии сведений о гидрометеорологических условиях (ГМУ) на маршруте полета, оператор может принять решение об облете локальных зон возмущений z_1 и z_2 по наименее выгодной траектории $h3$, затратив при этом время $t_{безучета ГМУ}$:

$$t_{безучета ГМУ} = t'_1 + t'_2. \quad (6)$$

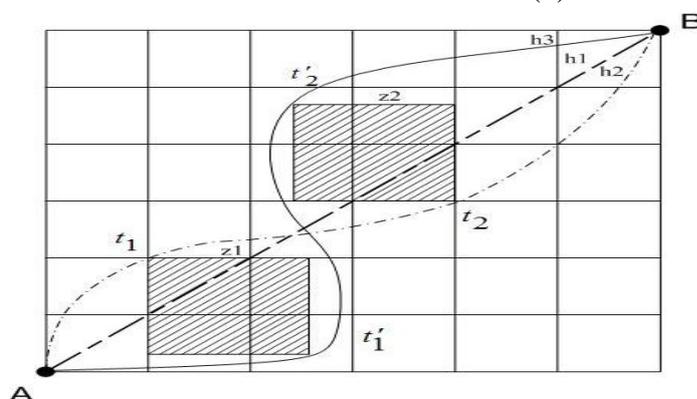


Рис. 4. Корректировка траектории полета беспилотного летательного аппарата при наличии локальных зон возмущений

Fig. 4. Correction of the flight path of an unmanned aerial vehicle in the presence of local zones of disturbances

С учетом ГМУ, в зависимости от скорости и направления перемещения локальных возмущений ДВ z_1 и z_2 , траектория полета может быть скорректирована и, например, иметь вид $h2$, при этом будет затрачено время $t_{с учетом ГМУ}$:

$$t_{с учетом ГМУ} = t_1 + t_2. \quad (7)$$

Рассмотренная ситуация показывает, что в случае когда ГМУ будут учтены при корректировке траектории полета, общее время выполнения ПЗ сократится на 20-30 %:

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{t_{i \text{ с учетом ГМУ}}}{t_{i \text{ без учета ГМУ}}} \right), \quad (8)$$

где: $K_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности; n – количество локальных зон возмущений;
 $t_{i \text{ с учетом ГМУ}}$ – время облета i -ой зоны локального возмущения с учетом ГМУ,
 $t_{i \text{ без учета ГМУ}}$ – время облета i -ой зоны локального возмущения без учета ГМУ.

Рассмотрим случай, когда наилучшим вариантом облета локальных возмущений является траектория h_2 . При корректировке траектории полета БЛА необходимо руководствоваться следующими стратегиями управления:

- если время t_{h_2} , затрачиваемое на облет локальных возмущений ДВ по траектории h_2 , меньше времени преодоления ДВ $t_{ДВi}$, и t_{h_2} меньше времени резерва $t_{резерв}$, то возможен облет по траектории h_2 :

$$u1 : t_{h_2} < t_{ДВi} \wedge t_{h_2} < t_{резерв} \Rightarrow h_2; \quad (9)$$

- если время t_{h_2} , затрачиваемое на облет локальных возмущений ДВ по траектории h_2 , больше времени преодоления ДВ $t_{ДВi}$, и $t_{ДВi}$ меньше времени резерва $t_{резерв}$, то целесообразно пролететь через зону локального возмущения:

$$u2 : t_{h_2} > t_{ДВi} \wedge t_{ДВi} < t_{резерв} \Rightarrow h1; \quad (10)$$

- если время t_{h_2} , затрачиваемое на облет локальных возмущений ДВ по траектории h_2 , больше времени преодоления ДВ $t_{ДВi}$, и $t_{ДВi}$ больше времени резерва $t_{резерв}$, то можно утверждать что ПЗ не будет выполнено и нужно возвращаться на стартовую площадку:

$$u3 : t_{h_2} > t_{ДВi} \wedge t_{ДВi} > t_{резерв} \Rightarrow \text{возвращение на стартовую площадку}. \quad (11)$$

Таким образом, для корректировки траектории полета СУ БЛА использует различные стратегии u , в зависимости от ТТХ БЛА, геометрических размеров зоны локальных возмущений ДВ и интенсивности фактора внешней среды.

Обсуждение результатов. В настоящее время оценка и прогноз интенсивности фактора внешней среды осуществляется на основе разнородной информации радиолокационной, спутниковой, данных наземных наблюдений имеющих низкую пространственно-временную изменчивость. Это затрудняет прогноз метеообстановки в условиях мезомасштаба.

Вместе с тем, выше описанная изменчивость метеорологических величин и явлений погоды особенно велика в условиях конвективно-неустойчивой атмосферы.

В этих условиях наблюдается интенсивное развитие таких опасных явлений погоды как обледенение, болтанка БЛА, горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра, гроза. Их прогноз для пространственного масштаба применения БЛА (100-500 км), с помощью существующих подходов затруднен. Поэтому в работе предлагается использование математических зависимостей, описывающих физические процессы, протекающие в атмосфере и приводящие к ОЯП на основе их моделирования.

Для оценки интенсивности фактора внешней среды, под которым в работе рассматриваются метеоусловия, и определения размеров зоны локальных возмущений была предложена математическая модель. Модель построена путем функционального объединения ряда частных моделей: модели, учитывающей гидротермодинамические, микрофизические и электрические процессы в атмосфере. Структурная схема модели представлена на рис. 5.

Гидротермодинамический блок модели состоит из дифференциальных нелинейных уравнений движения, описывающего влажную конвекцию, силы плавучести с учетом коэффициента вовлечения. Микрофизический блок описывает процессы взаимодействия частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками, а также коагуляцию облачных частиц под влиянием электрического поля облака. Электрический блок учитывает влияние электрического поля на эффективность столкновения заряженных капель.

Степень данной зависимости определяется размерами частиц, знаком и величиной их зарядов. Кроме эффекта поляризации капель, электрическое поле вызывает изменение скорости движения заряженных частиц, если их размеры достаточно малы. Чем меньше относительные скорости движения капель, тем больше импульс электрических сил. Поэтому электрические поля оказывают значительное влияние на протекающие процессы [19]. Взаимосвязь и взаимообусловленность данных уравнений дает возможность оценить энергетические запасы облачной атмосферы.



Рис. 5. Модель прогностических характеристик атмосферы

Fig. 5. Model of prognostic characteristics of the atmosphere

В формализованном виде эта модель может быть представлена с помощью системы уравнения движения (12) [20], в терминах функции Экснера, линеаризованного по термодинамическим переменным и учитывающие, адвективный и турбулентный перенос субстанций, силы плавучести, трения и барических градиентов:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\theta_{\phi} \cdot \nabla \pi' + \vec{n}_z g \left(\frac{\theta'}{\theta} - s' \right) + [\vec{V} \times \vec{f}] + \frac{1}{\rho} \Delta' \vec{V} \quad (12)$$

уравнения неразрывности для глубокой конвекции с учетом гидростатической сжимаемости воздуха (13) [21]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma w, \sigma = -\frac{d}{dz} [\ln \rho_{\phi cs}(z)] \cong 10^{-4} \text{ км}^{-1}, \rho_{\phi cs}(z) = \rho_0 \left(\frac{T_0}{T_0 - \gamma_z} \right)^{\left(\frac{g}{R_c j} - 1 \right)} \quad (13)$$

уравнений термодинамики с учетом выделяемого тепла фазовых переходов воды (14, 15) [22]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \theta = \frac{1}{\rho C_p} \left[L_c M_c + L_s \sum_s M_s + L_f M_f \right] + \Delta' \theta, \theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.288} \quad (14)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) s = -M_c - M_s + \Delta' s, \quad (15)$$

уравнений микрофизики (16) [23]:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r^2 \frac{dr}{dt}, \quad \frac{dr_g}{d\tau} = D \frac{\rho_{ex}}{\rho_g} \frac{1}{r_g} \frac{\mu}{M} \frac{E_g}{P} (f-1), \quad \frac{dr_l}{d\tau} = D \frac{\rho_{ex}}{\rho_l} \frac{1}{r_l} \frac{\mu}{M} \frac{E_g}{P} (f - \frac{E_l}{E_g}) \quad (16)$$

уравнения, учитывающего электрические процессы в атмосфере (17) [24]:

$$E(r^*, r) = \frac{1}{r^{*2}} \left[\frac{45 \cdot (\varepsilon - 1) \cdot q^2}{16 \rho g \cdot (\varepsilon + 2) \cdot (r^{*2}/r^2 - 1)} \right]^{\frac{2}{5}}, \quad (17)$$

уравнения для расчета водности и ледности (18, 19) [25]:

$$W_{i,j,k}^t = \sum_{i_m=0}^{\infty} i_m h_m f_{1,i,j,k}^{t,i_m} h_m, \quad (18)$$

$$I_{i,j,k}^t = \sum_{i_m=0}^{\infty} i_m h_m f_{2,i,j,k}^{t,i_m} h_m. \quad (19)$$

где $q = K \cdot r^2$, $(\vec{V} \cdot \nabla) = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$, $\Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z}$, $\pi = C_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^\xi$, p_0 – произвольное значение фонового давления (для удобства расчетов $p_0 = 1000$ гПа), $\xi = \frac{R_c}{C_p}$, (R_c и C_p – удельные газовая постоянная и теплоемкость при постоянном давлении сухого воздуха), \vec{n}_z – орт оси z, $\vec{V} = \{u, v, w\}$ – вектор скорости, $u(\vec{r})$, $\theta(\vec{r})$, $w(\vec{r})$ – компоненты вектора скорости воздушных потоков в облаке; $[\vec{V} \times \vec{f}]$ – параметр, учитывающий угловую скорость вращения Земли; $\theta(\vec{r})$ – потенциальная температура; $\pi(\vec{r}) = C_p \bar{\theta} (p(x, y, z)/1000)^{R_c/C_p}$ – безразмерное давление; $\bar{\theta}$ – средняя потенциальная температура; $s(\vec{r})$ – удельная влажность воздуха; $Q_s(\vec{r})$ – суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке; $\sigma(z)$ – параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой; $P(\vec{r})$ и $T(\vec{r})$ – соответственно давление и температура; L_c, L_s, L_f – соответственно удельная теплота конденсации, сублимации и замерзания; $\pi'(\vec{r}), \theta'(\vec{r}), s'(\vec{r})$ – отклонения безразмерного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере $\pi_\phi(\vec{r}), \theta_\phi(\vec{r})$ и $s_\phi(\vec{r})$; M_k, M_s – изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы; M_f – масса капельной воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха; $K(\vec{r})$ – коэффициент турбулентной диффузии, r – радиус облачных частиц; r^* – начальный радиус облачных частиц; q – заряд аэрозольной частицы, $E(r^*, r)$ – коэффициент коагуляции, g, ε – физические константы [26].

При этом начальные и граничные условия имеют вид (20):

$$\begin{aligned}
 \theta(x, y, z, 0) &= \theta_0(x, y, z), s(x, y, z, 0) = s_0(x, y, z), \varphi(x, y, z, 0) = \varphi_0(x, y, z), \\
 \theta(0, y, z, t) &= \theta_{x_0}(y, z, t), \theta(x, 0, z, t) = \theta_{y_0}(x, z, t), \theta(x, y, 0, t) = \theta_{z_0}(x, y, t), \\
 s(0, y, z, t) &= s_{x_0}(y, z, t), s(x, 0, z, t) = s_{y_0}(x, z, t), s(x, y, 0, t) = s_{z_0}(x, y, t), \\
 \varphi(0, y, z, t) &= \varphi_{x_0}(y, z, t), \varphi(x, 0, z, t) = \varphi_{y_0}(x, z, t), \varphi(x, y, 0, t) = \varphi_{z_0}(x, y, t), \\
 \varphi(L_x, y, z, t) &= \varphi_{x_L}(y, z, t), \varphi(x, L_y, z, t) = \varphi_{y_L}(x, z, t), \varphi(x, y, L_z, t) = \varphi_{z_L}(x, y, t),
 \end{aligned} \tag{20}$$

где $\varphi = \{u, v, w\}$.

Таким образом, состояние атмосферы будет описываться совокупностью протекающих в ней процессов, формализованных выражениями (12-19), а соответствующая априорная информация позволит получить прогностические характеристики параметров атмосферы.

Реализация этой модели позволяет получить в каждой пространственно-временной точке информацию о метеопараметрах и явлениях погоды, представленных в таблице.

Используя эти данные, на основании формул (12-19) с учетом имеющихся ограничений на выполнение полета БЛА, был проведен численный эксперимент с использованием данных температурно-ветрового зондирования атмосферы на заданной территории применения БЛА в период максимальной конвективной неустойчивости за период наблюдения с 2013 по 2017 года [27].

Отдельные реализации модели (12-19) представлены на рис. 6-7.

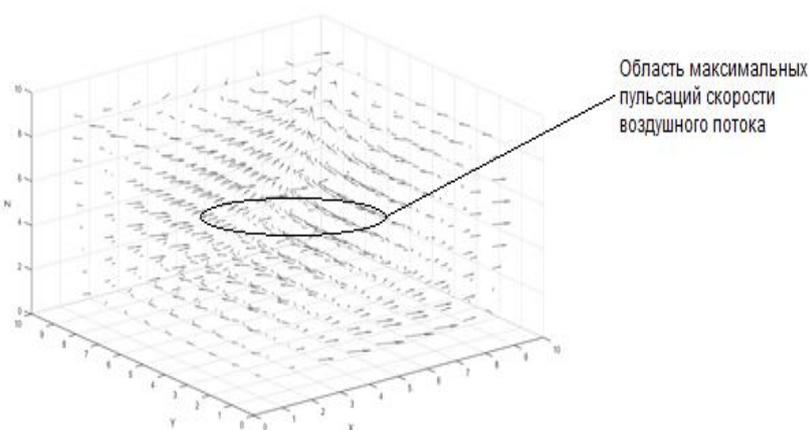


Рис.6. Поле скоростей воздушного потока при отсутствии дестабилизирующего воздействия (в условиях штилевой атмосферы)

Fig.6. Air flow velocity field in the absence of destabilizing effects (in calm conditions)

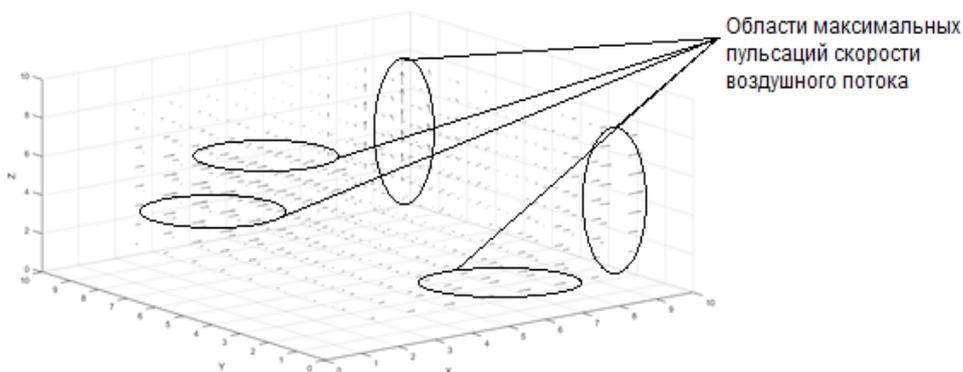


Рис. 7. Поле скоростей потока в момент времени t_{F10} начала влияния дестабилизирующего воздействия при наличии возмущений окружающего воздуха

Fig. 7. The flow velocity field at the time t_{F10} of the onset of the influence of the destabilizing effect in the presence of ambient air disturbances

Вывод. Анализ полученных результатов показал, что значения метеовеличин испыты-

вают значительную изменчивость даже в пределах однородной воздушной массы и определяются стратификацией атмосферы, а также условиями подстилающей поверхности и рядом других стохастических факторов. Если не учитывать метеовеличины в оперативной практике обеспечения полетов БЛА, то эффективность их применения значительно снизится.

В статье предложена методика расчета динамического показателя эффективности применения БЛА. Разработана методика выбора траектории облета локальных зон ДВ. Проведен анализ дестабилизирующих факторов внешней среды, влияющих на эффективность применения БЛА и выявлены их количественные показатели. Разработана математическая модель пространственно-временной изменчивости значений метеовеличин, влияющих на применение БЛА в условиях конвективно-неустойчивой атмосферы. Проведена оценка эффективности методики учета влияния метеорологических факторов на продолжительность полета БЛА по показателю общего времени выполнения задания БЛА.

Таким образом, в статье предложена методика, учитывающая влияние метеорологических факторов на продолжительность полета БЛА, основанная на принципах системного анализа, которая позволяет повысить эффективность применения БЛА в СМУ, обусловленных конвективно-неустойчивой атмосферой в среднем на 20-30 %.

Библиографический список:

1. Решение коллегия МЧС России «О Временных единых технических требованиях к робототехническим комплексам, беспилотным летательным аппаратам и прикладному программному обеспечению, к ним» [Электронный ресурс RL]: http://www.mchs.gov.ru/upload/site1/document_file/FVCQ8zUL4f.pdf (дата обращения 17.01.18).
2. Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи энергетических объектов. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». [Электронный ресурс]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (дата обращения: 17.01.18).
3. Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. N 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями). [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/196235/> (дата обращения: 17.01.18).
4. Мельников А.В. Построение оптимальной траектории полета беспилотного летательного аппарата при выполнении задачи поиска / А.В. Мельников, В.А. Гайдай, Е.А. Рогозин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – № 1. – С. 52–62.
5. Максимов А.Н. Боевые комплексы беспилотных летательных аппаратов. Научно-методические рекомендации. Издание ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского. 2005. – 236 с.
6. Моисеев Г.В., Моисеев В.С. Основы теории создания и применения имитационных беспилотных авиационных комплексов: монография. – Казань: Редакционно-издательский центр, 2013. – 208 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).
7. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. – 768 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).
8. Наровлянский Г.Я. Авиационная климатология. Л.: Гидромет. изд-во, 1968. С. 110–112.
9. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология. Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. С. 150.
10. Горбунов А.А. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала [Текст] / Горбунов А.А., Галимов А.Ф. // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2016. – Вып. №1. – С. 7–15.
11. Anandrao Shesherao Biradar. Wind Estimation and Effects of Wind on Waypoint Navigation of UAVs. / A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona State University. May 2014.
12. Martin Sele. Wind Corrections in Flight Path Planning / International Journal of Advanced Robotic Systems // Martin Sele, Petr Van, Milan Rollo, Tomas Meiser. Received 13 Jun 2012; Accepted 27 Jan 2013.
12. Daniel Stojcsics, Andras Molnar. Autonomous takeoff and landing control for small size unmanned aerial vehicles / Computing and Informatics, Vol. 32, 2013, 1117–1130.

13. Jack W. Langelaan. Wind Field Estimation for Small Unmanned Aerial Vehicles. /AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Toronto, Canada // Jack W. Langelaan, Nicholas Alley, James Neidhoefer. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Paper 2010-8177.
14. Дружинин В.В. Введение в теорию конфликта / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов, М.Д. Конторов. - М.: Радиоисвязь, 1989. - 288 с.
15. Тихонов В.И. и Миронов М.А. Марковские процессы. - М.: Сов. Радио, 1977.
16. Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи и энергетических объектов. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС»СТО 56947007- 29.200.10.235-2016. 2016 г.
17. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. / Ред. Совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1988. – Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. Ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. – 328 с.
18. Nguyen, Hang T.T. Klinskikh Fresh look at Lorenz-like system / Meleshenko P.A., Semenov M.E., Kuznetsov I.E., Gorlov V.A. // 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) // Shanghai, China, 2016.– P. 2255-2259, DOI: 10.1109/PIERS.2016.7734922.
19. Поташник, Э.Л., Кузнецов, А.Д. Математическое моделирование облачных процессов: учебное пособие / Э.Л. Поташник. – Санкт-Петербург. Издательство Российского государственного гидрометеорологического университета, 2010. – 444 с.
20. Шаповалов, В.А. Моделирование параметров облаков при глубокой конвекции / В.А. Шаповалов, К.А. Продан, И.Х. Машуков // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 2011. – С. 100–108.
21. Коган, Е.Л. Численное моделирование облаков / Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. – М.: Гидрометеоздат, 1984, 186 с.
22. Роджерс, Р.Р. Краткий курс физики облаков / под ред. И.П. Мазина. – Ленинград.: Гидрометеоздат, 1979. – 231 с.
23. Матвеев, Л.Т. Физика атмосферы / под ред. В.Г. Морачевского. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000. – 779 с.
24. Kuznetsov, I.E. On the interaction of electromagnetic waves with charged aerosol particles in atmosphere/ Semenov M.E., Kanishcheva O.I., Meleshenko P.A.// 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) // Shanghai, China, 2016.– P. 3542-3545, DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735367.
25. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Издательство Наука, 1977 – 352 с.
26. Кузнецов И.Е. Динамическая модель пространственно-временного распределения метеорологических параметров в условиях конвективно-неустойчивой атмосферы при использовании измерений с БЛА / И.Е. Кузнецов, О.В. Страшко, Н.М. Ситников. Сборник трудов 4 ЦНИИ «Моделирование параметров атмосферы в ракетно-космической технике» №135. – Королев, – 2017г. с. 81-86.

References:

1. Reshenie kollegii MChS Rossii “O Vremennykh edinykh tekhnicheskikh trebovaniyakh k robototekhnicheskim kompleksam, bespilotnym letatel'nykh apparatam i prikladnomu programmnomu obespecheniyu k nim”. [Elektronnyi resurs]. URL: http://www.mchs.gov.ru/upload/site1/document_file/FVCQ8zUL4f.pdf (data obrashcheniya 17.01.18). [Decision of the board of the Ministry of Emergency Measures of Russia “On temporary unified technical requirements for robotic systems, unmanned aerial vehicles and their applied software” [Electronic resource]. URL: http://www.mchs.gov.ru/upload/site1/document_file/FVCQ8zUL4f.pdf (access date 17.01.18). (in Russ.)]
2. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya obsledovaniya vozdushnykh linii elektroperedachii energeticheskikh ob"ektov. Standart organizatsii PАО “FSK EES”. [Elektronnyi resurs]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (data obrashcheniya 17.01.18). [Methodical instructions for the use of unmanned aerial vehicles for the inspection of overhead power transmission lines and power facilities. The standard of organization of PАО “FSK EES”. [Electronic resource]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (access date 17.01.18). (in Russ.)]
3. Prikaz Mintransa RF ot 31 iyulya 2009 g. N 128 “Ob utverzhdenii Federal'nykh aviatsionnykh pravil “Podgotovka i vypolnenie poletov v grazhdanskoj aviatsii Rossiiskoi Federatsii” (s izmeneniyami i dopolneniyami). [Elektronnyi resurs]. URL: <http://base.garant.ru/196235/> (data obrashcheniya 17.01.18). [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of July 31, 2009 N 128 “On approval of the Federal Aviation Regulations “Preparation and execution of flights of the civil aviation

- of the Russian Federation” (with amendments and additions). [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/196235/> (access date 17.01.18). (in Russ.)]
4. Mel'nikov A.V., Gaidai V.A., Rogozin E.A. Postroenie optimal'noi traektorii poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata pri vypolnenii zadachi poiska. Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2017;1:52–62. [Mel'nikov A.V., Gaidai V.A., Rogozin E.A. The construction of the optimal flight path of an unmanned aerial vehicle when performing a search task. The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2017;1:52–62. (in Russ.)]
 5. Maksimov A.N. Boevye komplekсы bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Nauchno-metodicheskie rekomendatsii. Izdanie VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo. 2005. 236 s. [Maksimov A.N. Combat complexes of unmanned aerial vehicles. Scientific and methodical recommendations. Izdanie VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo. 2005. 236 p. (in Russ.)]
 6. Moiseev G.V., Moiseev V.S. Osnovy teorii sozdaniya i primeneniya imitatsionnykh bespilotnykh aviatsionnykh kompleksov. Seriya “Sovremennaya prikladnaya matematika i informatika”. Kazan': Redaktsionno-izdatel'skii tsentr; 2013. 208 s. [Moiseev G.V., Moiseev V.S. Fundamentals of the theory of the creation and application of imitation unmanned aerial systems. Series “Modern Applied Mathematics and Informatics”. Kazan: GBU “Republican Center for Monitoring the Quality of Education”; 2013. 208 p. (in Russ.)]
 7. Moiseev V.S. Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Seriya “Sovremennaya prikladnaya matematika i informatika”. Kazan': GBU “Respublikanskii tsentr monitoringa kachestva obrazovaniya; 2013. 768 s. [Moiseev V.S. Applied theory of control of unmanned aerial vehicles. Series “Modern Applied Mathematics and Informatics”. Kazan: GBU “Republican Center for Monitoring the Quality of Education”; 2013. 768 p. (in Russ.)]
 8. Narovlyanskii G.Ya. Aviatsionnaya klimatologiya. L.: Gidromet. izd-vo; 1968. S. 110–112. [Narovlyanskii G.Ya. Aeronautical climatology. L.: Gidromet. izd-vo; 1968. P. 110–112. (in Russ.)]
 9. Pozdnyakova V.A. Prakticheskaya aviatsionnaya meteorologiya. Ekaterinburg: Ural'skii UTTs GA; 2010. S. 150. [Pozdnyakova V.A. Practical aeronautical meteorology. Ekaterinburg: Ural'skii UTTs GA; 2010. P. 150. (in Russ.)]
 10. Gorbunov A.A., Galimov A.F. Vliyanie meteorologicheskikh faktorov na primeneniye i bezopasnost' poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov s bortovym retranslyatorom radiosignala. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii. 2016;1:7–15. [Gorbunov A.A., Galimov A.F. Influence of meteorological factors on the use and safety of flight of unmanned aerial vehicles with on-board radio signal transponder. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPSMChSRossii. 2016;1:7–15. (in Russ.)]
 11. Biradar A. S. Wind estimation and effects of wind on waypoint navigation of UAVs. A thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science degree. Arizona State University. May 2014.
 12. Selecký M., Větra P., Rollo M., Meiser T. Wind corrections in flight path planning. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013;10:1-9.
 13. Stojcsics D., Molnar A. Autonomous takeoff and landing control for small size unmanned aerial vehicles. Computing and Informatics. 2013;32:1117–1130.
 14. Langelaan J.W. Alley N., Neidhoefer J. Wind field estimation for small unmanned aerial vehicles. AIAA guidance, navigation and control conference. Toronto: American Institute of Aeronautics and Astronautics; paper 2010-8177.
 15. Druzhinin V.V., Kontorov D.S., Kontorov M.D. Vvedenie v teoriyu konflikta. M.: Radio i svyaz'; 1989. 288 s. [Druzhinin V.V., Kontorov D.S., Kontorov M.D. Introduction to the theory of conflict. M.: Radio i svyaz'; 1989. 288 p. (in Russ.)]
 16. Tikhonov V.I., Mironov M.A. Markovskie protsessy. M.: Sov. Radio; 1977. [Tikhonov V.I., Mironov M.A. Markov processes. M.: Sov. Radio; 1977. (in Russ.)]
 17. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya obsledovaniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi i energeticheskikh ob'ektov. Standart organizatsii PAO “FSK EES” STO 56947007- 29.200.10.235-2016. 2016. [Methodical instructions for the use of unmanned aerial vehicles for the survey of overhead transmission lines and power facilities. The standard of organization of PAO “FSK EES” STO 56947007- 29.200.10.235-2016. 2016. (in Russ.)]
 18. Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: Spravochnik: V 10 t. T. 3. Effektivnost' tekhnicheskikh sistem. Pod red. V.S. Avduevskogo i dr. M.: Mashinostroenie; 1988. 328 s. [Reliability and efficiency in engineering: Handbook: In 10 vol. V. 3. Efficiency of technical systems. Ed. V.S. Avduevsky et al. M.: Mashinostroenie; 1988. 328 p. (in Russ.)]

18. Nguyen H.T.T., Meleshenko P.A., Semenov M.E., Kuznetsov I.E., Gorlov V.A., Klinskikh A.F. Fresh look at Lorenz-like system. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai; 2016. P. 2255-2259.
19. Potashnik E.L., Kuznetsov A.D. Matematicheskoe modelirovanie oblachnykh protsessov: uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta; 2010. 444 s. [Potashnik E.L., Kuznetsov A.D. Mathematical modeling of cloud processes: a tutorial. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta; 2010. 444 p. (in Russ.)]
20. Shapovalov V.A., Prodan K.A., Mashukov I.Kh. Modelirovanie parametrov oblakov pri glubokoi konveksii. Doklady Vserossiiskoi konferentsii po fizike oblakov i aktivnym vozdeistviyam na gidrometeorologicheskie protsessy. Nal'chik; 2011. S. 100–108. [Shapovalov V.A., Prodan K.A., Mashukov I.Kh. Modeling of cloud parameters for deep convection. Reports of the All-Russian conference on the physics of clouds and active effects on hydrometeorological processes. Nalchik; 2011. P. 100–108. (in Russ.)]
21. Kogan E.L., Mazin I.P., Sergeev B.N., Khvorost'yanov V.I. Chislennoe modelirovanie oblakov. M.: Gidrometeoizdat; 1984. 186 s. [Kogan E.L., Mazin I.P., Sergeev B.N., Khvorost'yanov V.I. Numerical modeling of clouds. M.: Gidrometeoizdat; 1984. 186 p. (in Russ.)]
22. Rodzhers R.R. Kratkii kurs fiziki oblakov. Pod red. I.P. Mazina. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1979. 231 s. [Rodzhers R.R. A short course in the physics of clouds. Ed. I.P. Mazin. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1979. 231 p. (in Russ.)]
23. Matveev L.T. Fizika atmosfery. Pod red. V.G. Morachevskogo. SPb.: Gidrometeoizdat; 2000. 779 s. [Matveev L.T. Physics of the atmosphere. Ed. V.G. Morachevsky. SPb.: Gidrometeoizdat; 2000. 779 p. (in Russ.)]
24. Kuznetsov I.E., Semenov M.E., Kanishcheva O.I., Meleshenko P.A. On the interaction of electromagnetic waves with charged aerosol particles in atmosphere. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai; 2016. P. 3542-3545, DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735367.
25. Marchuk G.I. Metody vychislitel'noi matematiki. M.: Nauka; 1977. 352 s. [Marchuk G.I. Methods of computational mathematics. M.: Nauka; 1977. 352 p. (in Russ.)]
26. Kuznetsov I.E., Strashko O.V., Sitnikov N.M. Dinamicheskaya model' prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya meteorologicheskikh parametrov v usloviyakh konvektivno-neustoichivoi atmosfery pri ispol'zovanii izmerenii s BLA. Sbornik trudov 4 TsNII "Modelirovanie parametrov atmosfery v raketno-kosmicheskoi tekhnike". Korolev.2017;135:81-86. [Kuznetsov I.E., Strashko O.V., Sitnikov N.M. Dynamic model of spatiotemporal distribution of meteorological parameters in conditions of convective-unstable atmosphere using measurements with UAV. Proceedings of the 4th CNII "Modeling the parameters of the atmosphere in rocket and space technology". Korolev.2017;135:81-86. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Рогозин Евгений Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел.

Мельников Алексей Викторович – научный сотрудник научно-исследовательского центра (образовательных и информационных технологий).

Страшко Олег Викторович – адъюнкт кафедры гидрометеорологического обеспечения.

Кузнецов Илья Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, начальник кафедры гидрометеорологического обеспечения.

Information about the authors:

Evgeny A. Rogozin - Dr.Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems.

Aleksey V. Melnikov - Researcher.

Oleg V. Strashko – Adjunct, Department of Hydrometeorological Support.

Илья Е. Kuznetsov – Dr.Sci. (Technical), Prof., Assoc. Prof., Head of the Department of Hydrometeorological Support.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.02.2018.

Принята в печать 30.04.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.02.2018.

Accepted for publication 30.04.2018.