УДК 629.7.067.8
DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-23-34

Методика аппроксимации трехмерных поверхностей в целях синтеза алгоритмов предотвращения столкновения летательных аппаратов с препятствиями

А.В. Воробьев[1], А.М. Леликов[1], В.В. Стрый[2]
[1]Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, г. Москва, Россия
[2]Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия

Аннотация: В работе положено начало практическому применению алгоритмов увода летательных аппаратов от трехмерных поверхностей ограничения, представляющих собой комбинацию рельефа местности и искусственных препятствий. Проведен анализ событий, приводящих к авиационным происшествиям, и осуществлено сравнение бортовых систем предварительного уведомления экипажей воздушных судов о столкновении с естественными или искусственными препятствиями. Показано, что такие системы являются недостаточными вследствие своего пассивно-рекомендательного характера выдачи предупреждений. Поставлен вопрос о необходимости реализации активной автоматической системы предотвращения столкновений с пространственными препятствиями. В целях применения имеющихся алгоритмов увода летательных аппаратов от пространственных поверхностей ограничения разработана методика аппроксимации трехмерных поверхностей (препятствий), заданных на цифровой карте местности в виде дискретных отсчетов высоты с определенным шагом на координатной сетке. В качестве аппроксимирующей препятствие непрерывной поверхности второго порядка выбран параболоид вращения, и определены его характеристические параметры. Для определения характеристических параметров параболоида предложены к использованию алгоритм определения пересечения трехмерной поверхности и плоскости, основанный на принципе определения пересечения треугольников в пространстве, а также метод выбора точки перегиба рельефа местности, основанный на определении значения градиента высоты рельефа местности. Приведено построение аппроксимирующего параболоида на примере естественного препятствия в виде горного массива. При синтезе алгоритмов предотвращения столкновения летательных аппаратов с препятствиями отмечена необходимость учета не только параметров поверхностей ограничения и динамических характеристик летательных аппаратов, но и точностных характеристик источников данных об их положении. Показаны перспективные направления применения разработанной методики.

Ключевые слова: безопасность полетов, предотвращение столкновений, увод с опасной высоты, цифровая карта местности, аппроксимация, трехмерная поверхность, алгоритмы.

Для цитирования: Воробьев А.В., Леликов А.М., Стрый В.В. Методика аппроксимации трехмерных поверхностей в целях синтеза алгоритмов предотвращения столкновения летательных аппаратов с препятствиями // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 23–34. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-23-34

The technique for approximation of three-dimensional surfaces in order to synthesize algorithms for preventing aircraft collisions with obstacles

A.V. Vorobyev[1], A.M. Lelikov[1], V.V. Stryy[2]
[1]State Scientific Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia
[2]Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: The work marks the beginning of the practical application of algorithms for making the aircraft recovery maneuver from three-dimensional constraint surfaces, which are a combination of terrain and artificial obstacles. An analysis of events leading to aviation accidents was carried out, and a comparison of on-board systems for preliminary notification of aircraft crews about

collisions with natural or artificial obstacles was made. It is shown that such systems are insufficient due to their passive-recommendatory nature of issuing warnings. A question has been raised about the need to implement an active automatic collision avoidance system with spatial obstacles. In order to apply existing algorithms for the aircraft recovery maneuver from spatial constraint surfaces, a technique has been developed for approximating three-dimensional surfaces (obstacles) specified on a digital terrain map in the form of discrete height readings with a certain step on a coordinate grid. A paraboloid of revolution was chosen as a continuous 2nd order surface approximating the obstacle, and its characteristic parameters were determined. To determine the characteristic parameters of the paraboloid, an algorithm for determining the intersection of a three-dimensional surface and a plane, based on the principle of determining the intersection of triangles in space, as well as a method for selecting the inflection point of the terrain, based on determining the value of the terrain height gradient, are proposed for use. The construction of an approximating paraboloid using the example of a natural obstacle in the form of a mountain range is given. When synthesizing algorithms for preventing collisions of aircraft with obstacles, the need to take into account not only the parameters of the constraint surfaces and dynamic characteristics of aircraft, but also the accuracy characteristics of data sources about their position is noted. Promising application areas of the developed methodology are shown.

Key words: flight safety, collision avoidance, aircraft recovery maneuver, digital terrain map, approximation, three-dimensional surface, algorithms.

For citation: Vorobyev, A.V., Lelikov, A.M., Stryy, V.V. (2024). The technique for approximation of three-dimensional surfaces in order to synthesize algorithms for preventing aircraft collisions with obstacles. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 23–34. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-23–34

Введение

Согласно данным отчетов Межгосударственного авиационного комитета (МАК) о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации государств – участников Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства[1] количество столкновений воздушных судов (ВС) с различными препятствиями в управляемом полете достаточно велико. Так, за период с 2001 по 2018 г. 17 % событий, приводящих к авиационным происшествиям (АП), и 16 % событий, приводящих к катастрофам, с самолетами коммерческой авиации в Российской Федерации приходилось на столкновение с земной поверхностью или препятствиями в управляемом полете [1]. В 2020 г. целых 7 % от общего количества АП приходилось на столкновения с проводами и опорами линий электропередачи (ЛЭП). А уже в 2022 г., очевидно вследствие недостаточного изучения района полетов, отвлечения внимания и недостаточной осмотрительности экипажей ВС, это число достигло более 15 % от общего количества АП.

Для уменьшения количества АП, входящих, согласно Международной организации гражданской авиации (ИКАО), в класс столкновений исправного ВС с земной поверхностью (CFIT – Controlled Flight Into Terrain), были созданы бортовые системы предварительного уведомления экипажей ВС о столкновении с естественными или искусственными препятствиями. Одной из таких систем стала GPWS (Ground Proximity Warning System), которая с конца 1970-х годов использовалась на большинстве ВС, осуществляющих коммерческие перевозки. Сигналы GPWS формируются исходя из оценки истинной высоты полета, определяемой по радиовысотомеру, вертикальной скорости, положения ВС относительно глиссады, а также положения шасси и механизации крыла. Очевидно, что при наличии различных препятствий по курсу ВС GPWS может быть крайне неэффективна, так как времени от момента срабатывания сигнализации до столкновения бывает недостаточно для уклонения от препятствия.

Для оповещения экипажей ВС о препятствиях по курсу были разработаны системы оповещения, включающие базы данных рельефа местности и искусственных препятствий. Данные системы относят к системам TAWS (Terrain Awareness And Warning System). К системам TAWS относят и системы

[1] Отчеты Межгосударственного авиационного комитета о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации [Электронный ресурс] // mak-iac.org. URL: https://mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov/ (дата обращения: 02.06.2023).

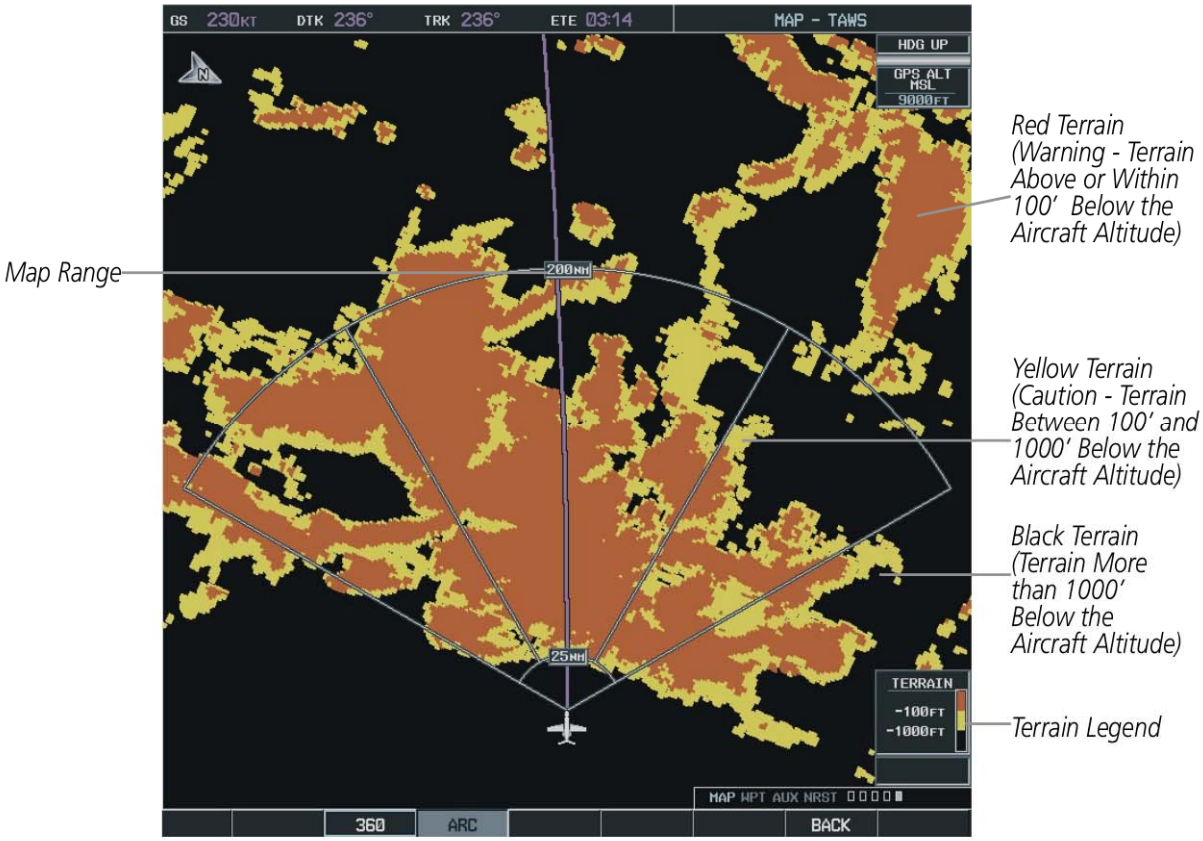

Рис. 1. Отображение рельефа местности на навигационном дисплее Cessna Citation Mustang
Fig. 1. Terrain view on the Cessna Citation Mustang navigation display

EGPWS (Enhanced GPWS)[2], являющиеся следующим поколением GPWS. Главным отличием системы EGPWS от GPWS является функция FLTA (Forward Looking Terrain Avoidance), то есть функция оценки угрозы столкновения с препятствиями по курсу полета. Обновляемая база данных, входящая в состав EGPWS, включает информацию о препятствиях вокруг основных аэродромов и данные о рельефе местности в регионе полетов. Информация из базы данных, при использовании соответствующего режима, выводится на навигационные дисплеи в кабине экипажа ВС[3] (рис. 1).

При наличии на борту ВС систем типа TAWS, а также своевременных и правильных действий со стороны экипажа обеспечивается достаточно безопасное расхождение с естественными или искусственными препятствиями. Однако возможность внезапного отключения части функциональности EGPWS, например, такой как получение данных о рельефе местности или получение данных о положении шасси или механизации крыла, может привести к аварийным или катастрофическим ситуациям. Так, отключение получения данных о рельефе местности привело к катастрофе самолета Sukhoi Superjet 100 9 мая 2012 г. в Индонезии. Экипаж выполнял визуальный демонстрационный полет на малой высоте в горной местности в незнакомом для себя районе и столкнулся со склоном горы Салак. Погибли все 45 человек, находившихся на борту.

Помимо естественных (горные массивы, опасные явления погоды и т. п.) и искус-

[2] Honeywell MK VI & MK VIII EGPWS Pilot Guide [Электронный ресурс] // SKYbrary. May 2004. 60 p. URL: https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3365.pdf (дата обращения: 02.06.2023).

[3] Garmin G1000 Pilot's Guide for the Cessna Citation Mustang [Электронный ресурс] // static.garmin.com. May 2007. 508 p. URL: https://static.garmin.com/pumac/G1000:CessnaMustang_PilotsGuide.pdf (дата обращения: 02.06.2023).

ственных (высотные здания, линии электропередач и т. п.) в качестве препятствий следует учитывать и различные зоны ограничений полетов (в том числе зоны противовоздушной обороны, области разлета осколков боеприпасов и т. п.).

Таким образом, системы типа TAWS хоть и могут оценивать вероятность столкновения с земной поверхностью и другими естественными или искусственными препятствиями, но из-за большого влияния человеческого фактора во многих ситуациях являются недостаточными вследствие своего пассивно-рекомендательного характера выдачи предупреждений.

Постановка задачи

При достаточно большом количестве АП, причиной которых являлось столкновение с земной поверхностью или препятствиями в управляемом полете, остается открытым вопрос о том, почему производители ВС, оснащенных системами дистанционного и автоматического управления (СДУ, САУ), в том числе адаптивными и прогнозирующими [2], потенциально имеющими выходы на рулевые приводы и достаточно мощные вычислительные системы, включающие в себя модули подробных цифровых карт местности (ЦКМ) и обширное количество датчиков (бесплатформенные инерциальные навигационные системы – БИНС, приемники глобальных навигационных спутниковых систем – ГНСС и т. п.), до сих пор ограничиваются в основном предупреждениями о приближении к поверхности и начали реализовывать логические последовательности и алгоритмы предотвращения столкновений с пространственными препятствиями относительно недавно[4] [3, 4].

В работах [5, 6] рассмотрены алгоритмы увода летательных аппаратов (ЛА) в том числе от различных препятствий. Фундаментальной основой данных алгоритмов являются уравнения пространственных поверхностей ограничения, однако конкретные методики расчета параметров этих уравнений не проработаны.

Для практического применения алгоритмов увода ЛА от пространственных поверхностей ограничения следует учитывать особенности задания рельефа местности и различных препятствий на ЦКМ, которые чаще всего задаются в виде дискретных отсчетов высоты с определенным шагом на координатной сетке[5], т. е. не могут быть использованы напрямую в алгоритме увода вследствие своей дискретной природы.

Таким образом, необходимо разработать методику аппроксимации трехмерных поверхностей (препятствий), заданных на ЦКМ, обеспечивающую корректную и в то же время приемлемую по быстродействию работу указанных выше алгоритмов.

В качестве примера возьмем естественное препятствие в виде горного массива (рис. 2) и аппроксимируем его уравнением непрерывной поверхности 2-го порядка (высота $\boldsymbol{H_{ЦКМ}}$ на рис. 2 указана в метрах согласно системе координат WGS84/EGM96):

$$\varphi(x, y, z) = 0. \quad (1)$$

Выбор непрерывной поверхности 2-го порядка (1) в качестве аппроксимирующей поверхности обусловлен в том числе и тем, что при работе алгоритма увода ЛА должен совершать маневры по непрерывной траектории, которая должна быть физически реализуема и не приводить ЛА к критическим режимам полета. Данная траектория, согласно алгоритму увода [5], располагается в некоторой плоскости $\boldsymbol{U}$, содержащей нормаль $\boldsymbol{N_K}$ к аппроксимирующей поверхности в точке $\boldsymbol{T}$, получаемой пересечением линии вектора скорости самолета с этой поверхностью. При включении в работу алгоритма увода ЛА изменяет свое положение в пространстве, соответственно, изменяется и положение точки $\boldsymbol{T}$

[4] Automatic Ground Collision Avoidance System (Auto GCAS) [Электронный ресурс] // lockheedmartin. URL: https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/autogcas.html (дата обращения: 01.11.2023).

[5] Shuttle Radar Topography Mission website [Электронный ресурс] // NASA. URL: http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/ (дата обращения: 01.11.2023).

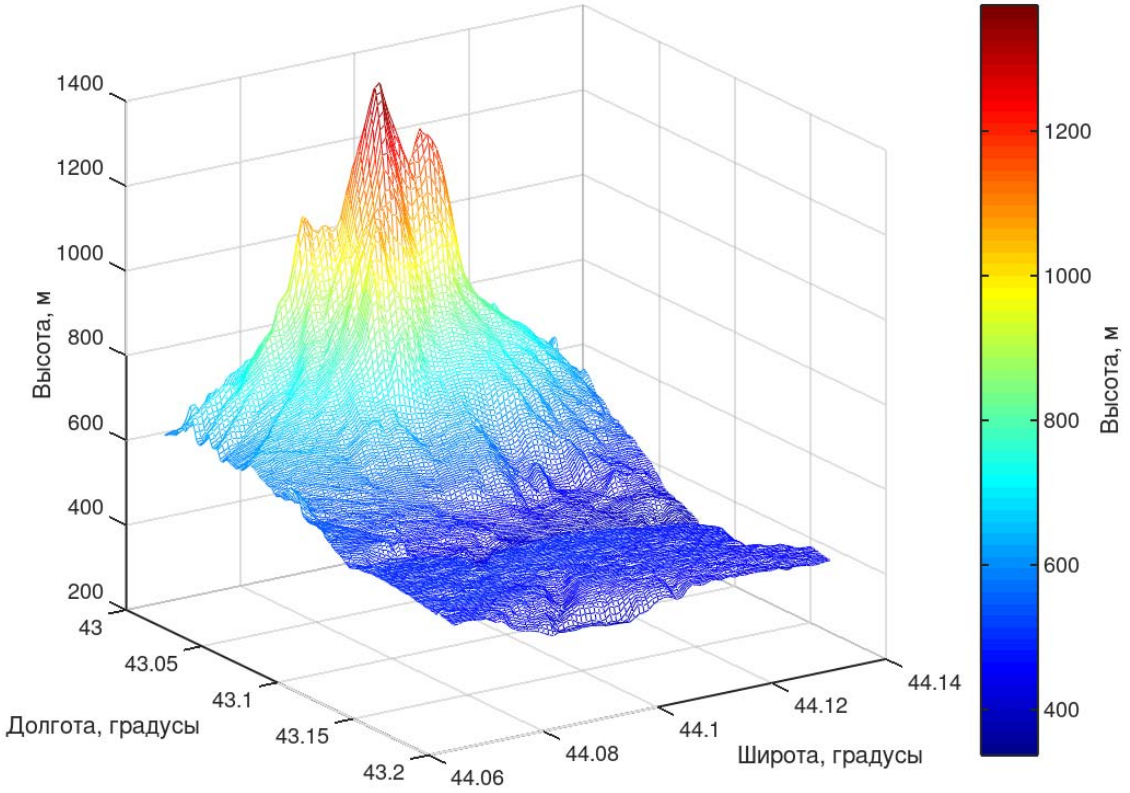

Рис. 2. Пример изображения горного массива на цифровой карте местности
Fig. 2. Example of the mountain range view on the digital terrain map

на поверхности ограничения. Вследствие изменения положения точки ***T*** изменяются и параметры ориентации в пространстве плоскостей ***U*** и ***K***, где плоскость ***K*** – это плоскость, касательная к поверхности ограничения в точке ***T***.

Применение поверхностей 1-го порядка в качестве аппроксимирующих допустимо для равнинного рельефа, а принципиальная возможность применения поверхностей 3-го порядка требует дальнейшей проработки.

Таким образом, исходя из требования к изменению параметров ориентации в пространстве плоскостей ***U*** и ***K***, а именно возможности непрерывного построения касательной плоскости ***K***, то есть непрерывному изменению первой производной аппроксимирующей функции [7], выбор поверхности 2-го порядка в качестве аппроксимирующей поверхности является оптимальным по сравнению с поверхностями 1-го и 3-го порядка для рассматриваемого в данном примере горного рельефа местности.

Методика аппроксимации трехмерных поверхностей

В качестве аппроксимирующей трехмерную поверхность (препятствие) непрерывной поверхности 2-го порядка возьмем параболоид вращения и определим координаты его вершины, а также параметры его основания. Для этого находим максимальную ближайшую высоту рельефа местности в упреждаемой зоне (рис. 3). Эта точка и будет вершиной $\boldsymbol{P_0}$ параболоида.

На рис. 3 ЛА находится в точке ***A***, отрезок ***AB*** обозначает направление вектора скорости ЛА, а точка ***B*** обозначает место пересечения вектора скорости ЛА и рельефа местности.

В качестве точки P_1, определяющей параметры основания параболоида (то есть его высоту и радиус), берем ближайшую к ЛА

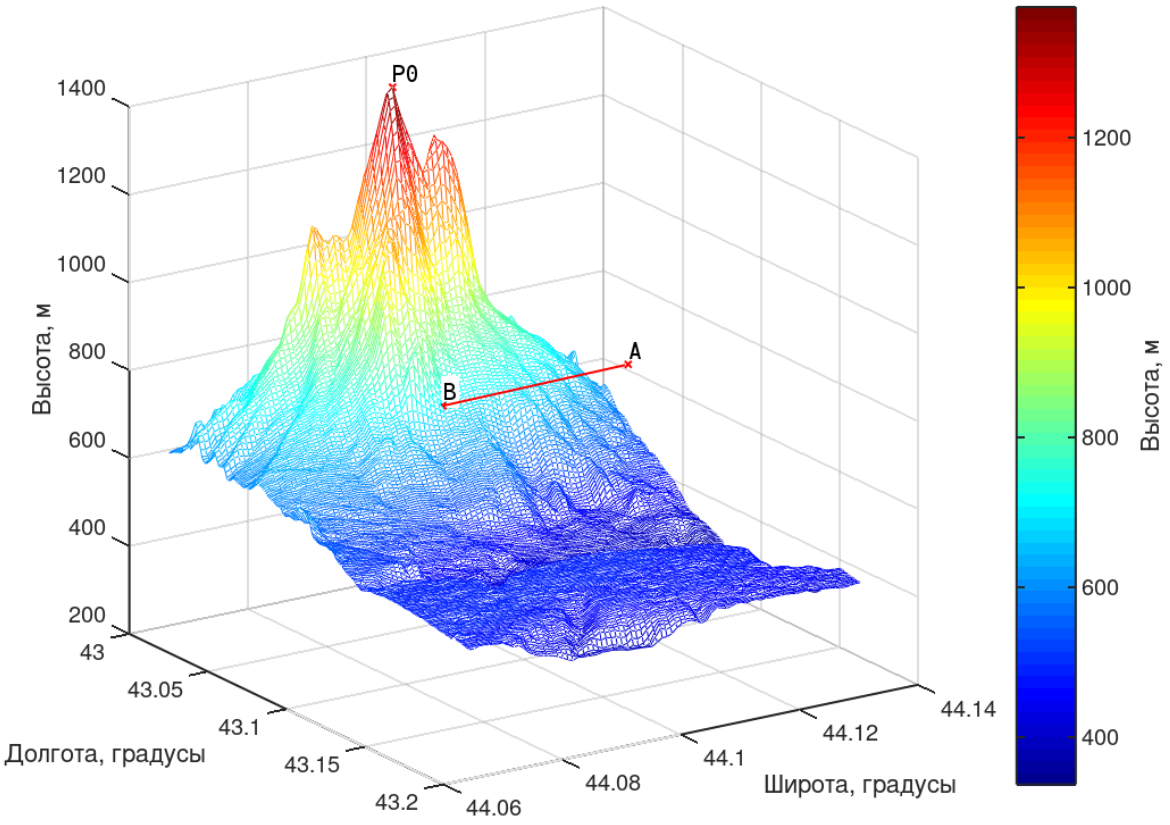

Рис. 3. К определению координат вершины P_0 параболоида
Fig. 3. Determining the coordinates of the paraboloid vertex P_0

точку перегиба рельефа местности, у которой значение градиента высоты равно, например, 10. Для этого, используя алгоритм Томаса Меллера [8], построим срез высоты рельефа местности вертикальной плоскостью (рис. 4 и 5), в которой лежит вектор скорости ЛА.

Конкретное значение величины градиента высоты, при котором происходит определение координат точки P_1, выбирается динамически, исходя из маневренных возможностей ЛА и параметров включения системы увода ЛА от препятствия в работу.

График значения градиента высоты рельефа местности представлен на рис. 6.

Построим требуемый аппроксимирующий параболоид в условной системе координат ***ENH*** исходя из известных параметров точек $\boldsymbol{P_0}$ и $\boldsymbol{P_1}$. Для построения параболоида найдем его коэффициенты $\boldsymbol{a}$ и $\boldsymbol{b}$. Коэффициенты эллиптического параболоида $\boldsymbol{a}$ и $\boldsymbol{b}$ – это положительные параметры, характеризующие параболоиды, причем для эллиптического параболоида $\boldsymbol{a} \geq \boldsymbol{b}$, а для параболоида вращения $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{b}$ [9].

Каноническое уравнение эллиптического параболоида, «развернутого» основанием вниз:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -2z. \quad (2)$$

Для параболоида вращения:

$$a = b. \quad (3)$$

Соответственно:

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} = -2z. \quad (4)$$

Домножив обе части уравнения (4) на $\boldsymbol{b^2}$, получим

$$x^2 + y^2 = -2b^2 z. \quad (5)$$

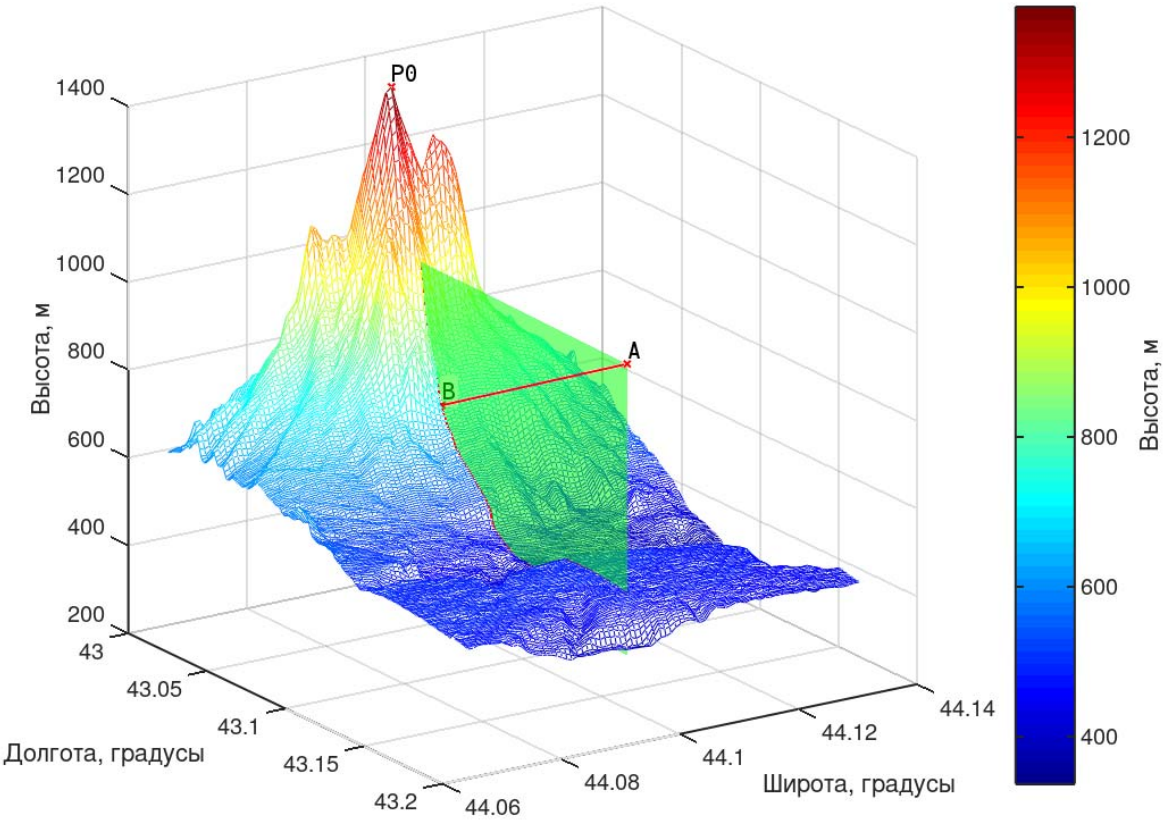

Рис. 4. Плоскость, в которой лежит вектор скорости ЛА
Fig. 4. The plane in which the aircraft velocity vector lies

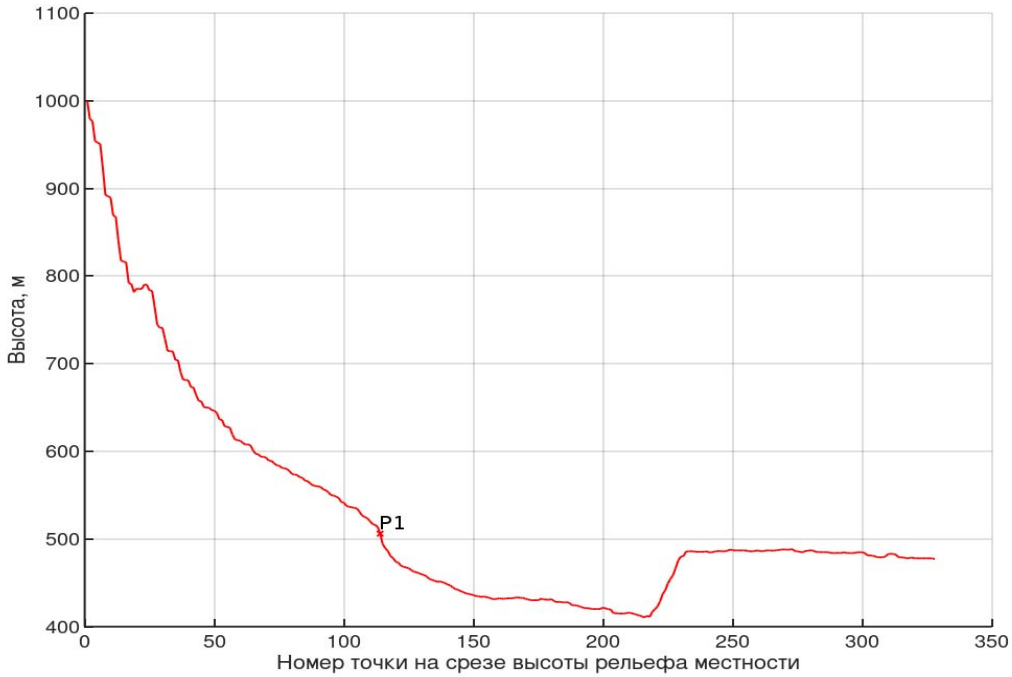

Рис. 5. Срез высоты рельефа местности
Fig. 5. Terrain elevation section

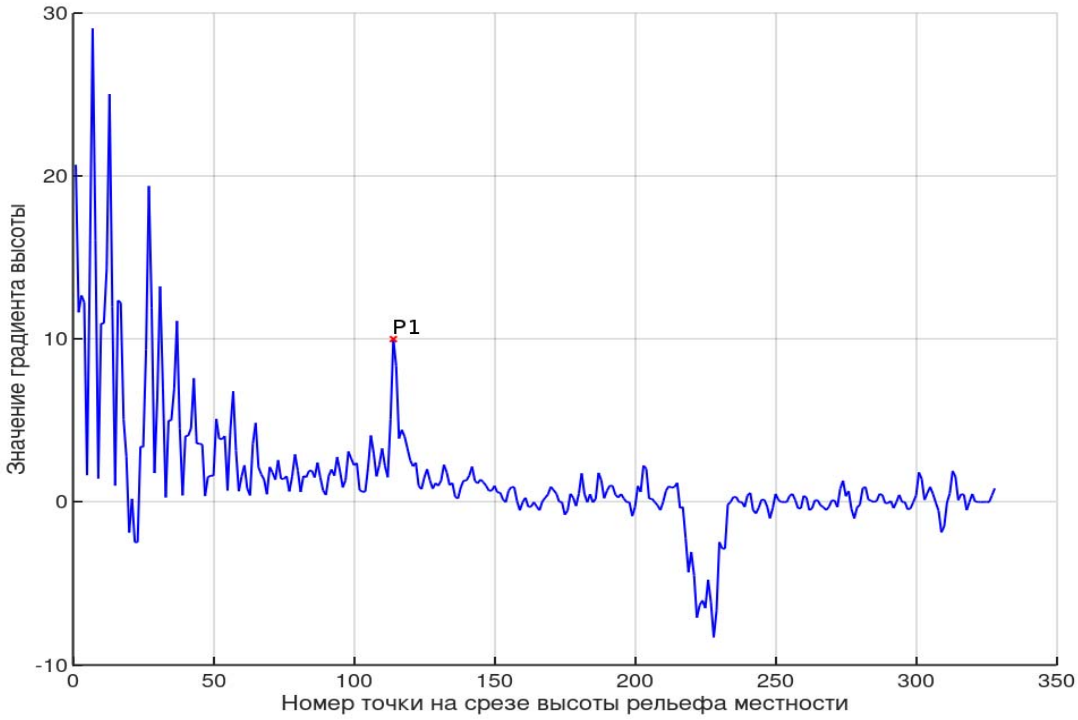

Рис. 6. График значения градиента высоты рельефа местности
Fig. 6. Graph of the terrain elevation gradient value

Так как вершина параболоида находится в точке $\boldsymbol{P_0}$ с координатами $\boldsymbol{P_{0E}}$, $\boldsymbol{P_{0N}}$ и $\boldsymbol{P_{0H}}$, то уравнение (5) будет выглядеть так:

$$(x - P_{0E})^2 + (y - P_{0N})^2 = -2b^2(z - P_{0H}). \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что коэффициент $\boldsymbol{b}$ равен

$$b = \sqrt{\frac{(x-P_{0E})^2+(y-P_{0N})^2}{-2(z-P_{0H})}} \quad (7)$$

или

$$b = \sqrt{\frac{(x-P_{0E})^2+(y-P_{0N})^2}{2(P_{0H}-z)}}. \quad (8)$$

Для вычисления значения коэффициента $\boldsymbol{b}$ подставим в уравнение (8) значения координат точки $\boldsymbol{P_1}$, лежащей на параболоиде. В качестве такой точки возьмем точку, лежащую в плоскости основания параболоида и находящуюся в точке пересечения окружности радиусом $\boldsymbol{R_0}$ с плоскостью $\boldsymbol{EOH}$, где $\boldsymbol{O}$ – точка начала координат системы координат $\boldsymbol{ENH}$. Координатами одной из таких точек будут, очевидно, следующие:

$P_{1E} = P_{0E} - R_0$;
$P_{1N} = P_{0N}$;
$P_{1H} = H_0$.

Тогда

$$b = \sqrt{\frac{(P_{0E}-R_0-P_{0E})^2+(P_{0N}-P_{0N})^2}{2(P_{0H}-H_0)}}.$$

То есть

$$b = \sqrt{\frac{R_0^2}{2(P_{0H}-H_0)}}. \quad (9)$$

Представим уравнение (6) в виде $\boldsymbol{z = f(x,y)}$ и подставим в него значение коэффициента $\boldsymbol{b}$:

$$z = \frac{(x-P_{0E})^2+(y-P_{0N})^2}{-2b^2} + P_{0H};$$

$$z = \frac{(x-P_{0E})^2+(y-P_{0N})^2}{-2\left(\sqrt{\frac{R_0^2}{2(P_{0H}-H_0)}}\right)^2} + P_{0H};$$

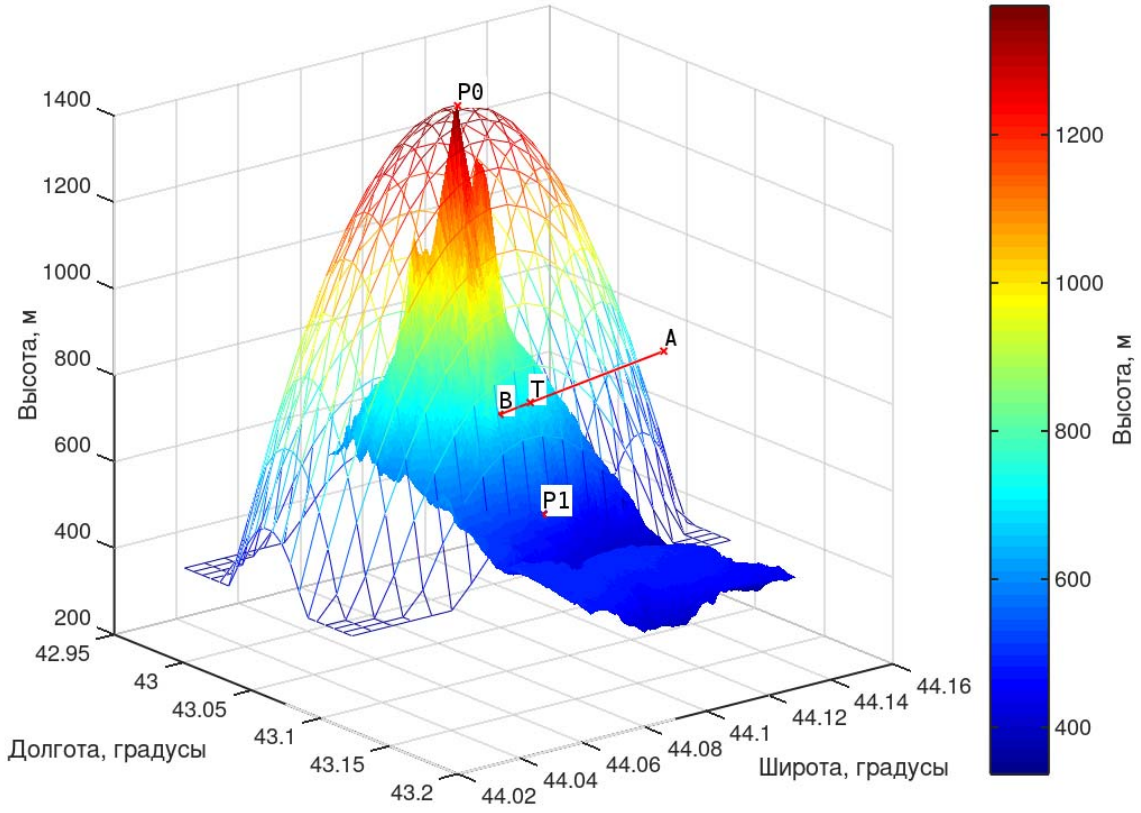

Рис. 7. Поверхность ограничения
Fig. 7. Constraint surface

$$z = \frac{(x-P_{0E})^2+(y-P_{0N})^2}{\frac{-R_0^2}{P_{0H}-H_0}} + P_{0H};$$

$$z = P_{0H} - \frac{((x-P_{0E})^2+(y-P_{0N})^2)(P_{0H}-H_0)}{R_0^2}. \quad (10)$$

Уравнение (10) и есть искомое уравнение параболоида вращения с учетом коэффициентов ***a*** и ***b***.

Так как нижняя граница поверхности ограничения должна совпадать с реальным рельефом поверхности земли, включая препятствия, ограничим уравнение (10) снизу высотой $\boldsymbol{H_{ЦКМ}}$ согласно цифровой карте местности:

$$\begin{cases} z = P_{0H} - \frac{((x-P_{0E})^2+(y-P_{0N})^2)(P_{0H}-H_0)}{R_0^2} \\ z \geqslant H_{\text{ЦКМ}} \end{cases}. \quad (11)$$

Изображение системы уравнений (11) в трехмерном пространстве показано на рис. 7, где нижняя граница $\boldsymbol{H_{ЦКМ}}$ поверхности ограничения показана условно.

Точка ***T*** на рис. 7 является точкой пересечения поверхности ограничения и вектора скорости ЛА и может определяться аналогично точке ***B*** по алгоритму Томаса Меллера и Бена Трамбора [10] или для «бортовой» реализации при помощи точного аналитического решения системы уравнений поверхности (11) и прямой ***AB***, содержащей вектор скорости ЛА.

Заключение

Показанная в данной работе методика аппроксимации трехмерных поверхностей позволяет осуществить переход от дискретного представления цифровой карты местности к математически точному описанию препят-

ствий, пригодному к использованию в бортовых алгоритмах увода ЛА от пространственных поверхностей ограничения.

Однако стоит заметить, что при разработке и реализации алгоритмов предотвращения столкновений с пространственными препятствиями важно учитывать не только параметры поверхностей ограничения и динамические характеристики самолета, но и точностные характеристики источников данных о положении самолета, таких как БИНС и приемники ГНСС [11].

Аппроксимацию трехмерных поверхностей (препятствий), согласно описанной в данной работе методике, при отсутствии достаточных вычислительных возможностей на борту ЛА можно производить и на земле при подготовке полетного задания в соответствующей автоматизированной системе. Для снижения объема пространственных данных как на борту ЛА, так и при работе с ЦКМ на земле стоит предусмотреть возможность их сжатия [12].

Данная методика может быть использована в алгоритмическом обеспечении адаптивных систем предотвращения столкновения с рельефом (АСПСР) [13], а также в специализированных бортовых алгоритмах, обеспечивающих оперативное перестроение маршрута полета ЛА [14, 15].

Авторы выражают благодарность А.Н. Акимову, В.В. Воробьеву и М.А. Киселеву за помощь в подготовке статьи.

Список литературы

1. Воробьев В.В., Беляцкая А.П., Суполка А.А. Методика устранения отклонений воздушного судна при предпосадочном снижении для предотвращения происшествий категории CFIT // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 4. С. 33–44. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-33-44

2. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М.: Наука, 1987. 232 с.

3. Sorokowski P. Small UAV automatic ground collision avoidance system design considerations and flight test results / P. Sorokowski, M. Skoog, S. Burrows, S. Thomas [Электронный ресурс] // NASA. 2015. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/20150014106 (дата обращения: 15.08.2023).

4. Suplisson A.W. Optimal recovery trajectories for automatic ground collision avoidance systems (Auto GCAS) [Электронный ресурс] // Theses and Dissertations. 2015. URL: https://scholar.afit.edu/etd/183 (дата обращения: 15.08.2023).

5. Акимов А.Н., Воробьев В.В. Методика и алгоритмы увода летательного аппарата от пространственной поверхности ограничения // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 18–25.

6. Акимов А.Н. Особенности проектирования легких боевых и учебно-тренировочных самолетов / А.Н. Акимов, В.В. Воробьев, О.Ф. Демченко, Н.Н. Долженков, А.И. Матвеев, В.А. Подобедов. М.: Машиностроение – Полет, 2005. 368 с.

7. Виноградов И.М. Элементы высшей математики. Аналитическая геометрия. Дифференциальное исчисление, основы теории чисел: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1999. 511 с.

8. Möller T. A fast triangle-triangle intersection test // Journal of Graphics Tools. 1997. Vol. 2, iss. 2. Pp. 25–30. DOI: 10.1080/10867651.1997.10487472

9. Мурашкина Т.И., Королев Е.А., Егоров А.Ю. Особенности методики преподавания темы «Парабола и параболоид» в курсах математики и инженерной графики [Электронный ресурс] // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. № V11. С. 43–52. DOI: 10.24422/MCITO.2017.V11.8137 (дата обращения: 15.08.2023).

10. Möller T., Trumbore B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection // Journal of Graphics Tools. 1997. Vol. 2, iss. 1. Pp. 21–28. DOI: 10.1080/10867651.1997.10487468

11. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.

12. Inanc M. Compressing terrain elevation datasets [Электронный ресурс] // Rensselaer Theses and Dissertations Online Collection. 2008. URL: https://hdl.handle.net/20.500.13015/539 (дата обращения: 15.08.2023).

13. Акимов А.Н., Волошин В.А., Супряга А.А. Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы предотвращения столкновения с рельефом (АСПСР) // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-8-22

14. Киселев М.А. Анализ существующих подходов к перестроению маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, Ю.В. Петров // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

15. Vajda P., Maris J. A systematic approach to developing paths towards airborne vehicle autonomy [Электронный ресурс] // NASA. 2021. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/20210019878 (дата обращения: 15.08.2023).

References

1. Vorobyev, V.V., Beliatskaya, A.P., Supolka, A.A. (2020). Methodic aspects of aircraft glide slope correction for prevention of cfit category accidents during pre-landing descent. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 4, pp. 33–44. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-33-44 (in Russian)

2. Bukov, V.N. (1987). Adaptive predictive flight control systems. Moscow: Nauka, 232 p. (in Russian)

3. Sorokowski, P., Skoog, M., Burrows, S., Thomas, S. (2015). Small UAV automatic ground collision avoidance system design considerations and flight test results. Available at: https://ntrs.nasa.gov/citations/20150014106 (accessed: 15.08.2023).

4. Suplisson, A.W. (2015). Optimal recovery trajectories for automatic ground collision avoidance systems (Auto GCAS). *Theses and Dissertations*. Available at: https://scholar.afit.edu/etd/183 (accessed: 15.08.2023).

5. Akimov, A.N., Vorob'ev, V.V. (2001). A method and algorithms for veering a flying apparatus from the spatial constraint surface. *Automation and Remote Control*, vol. 62, no. 7, pp. 1042–1048.

6. Akimov, A.N., Vorobyev, V.V., Demchenko, O.F., Dolzhenkov, N.N., Matveev, A.I., Podobedov, V.A. (2005). Features of the designing light combat and training aircrafts. Moscow: Mashinostroyeniye – Polet, 368 p. (in Russian)

7. Vinogradov, I.M. (1999). Elements of higher mathematics. Analytical geometry. Differential calculus, fundamentals of number theory. Textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola, 511 p. (in Russian)

8. Möller, T. (1997). A fast triangle-triangle intersection test. *Journal of Graphics Tools*, vol. 2, issue 2, pp. 25–30. DOI: 10.1080/10867651.1997.10487472

9. Murashkina, T.I., Korolev, E.A., Egorov, A.Yu. (2017). Features of the methodology for teaching the topic “Parabola and paraboloid” in mathematics and engineering graphics courses. *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal “Kontsept”*, no. V11, pp. 43–52. DOI: 10.24422/MCITO.2017.V11.8137 (accessed: 15.08.2023). (in Russian)

10. Möller, T., Trumbore, B. (1997). Fast, minimum storage ray-triangle intersection. *Journal of Graphics Tools*, vol. 2, issue 1, pp. 21–28. DOI: 10.1080/10867651.1997.10487468

11. Babich, O.A. (1991). Information processing in navigation complexes. Moscow: Mashinostroyeniye, 512 p. (in Russian)

12. Inanc, M. (2008). Compressing terrain elevation datasets. *Rensselaer Theses and Dissertations Online Collection*. Available at: https://hdl.handle.net/20.500.13015/539 (accessed: 15.08.2023).

13. Akimov, A.N., Voloshin, V.A., Supryga, A.A. (2022). Algorithmic support of the adaptive system of controlled flight into terrain avoidance (CFITA). *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 6, pp. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-8-22 (in Russian)

14. Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Yu.S., Karpov, A.V., Petrov, Yu.V. (2023). Analysis

of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 3, pp. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65. (in Russian)

15. Paul, V., John, M. (2021). A systematic approach to developing paths towards airborne vehicle autonomy. *NASA*. Available at: https://ntrs.nasa.gov/citations/20210019878 (accessed: 15.08.2023).

Сведения об авторах

Воробьев Алексей Витальевич, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС», vorobev_av@gosniias.ru.

Леликов Алексей Максимович, техник ФАУ «ГосНИИАС», lelikov_am@gosniias.ru.

Стрый Владимир Васильевич, аспирант кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, xeonerix@gmail.com.

Information about the authors

Aleksey V. Vorobyev, Leading Engineer, State Scientific Research Institute of Aviation Systems, vorobev_av@gosniias.ru.

Aleksey M. Lelikov, Technician, State Scientific Research Institute of Aviation Systems, lelikov_am@gosniias.ru.

Vladimir V. Stryy, Postgraduate Student of the Aerodynamics, Design and Aircraft Strength Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, xeonerix@gmail.com.

Поступила в редакцию	11.01.2024	Received	11.01.2024
Одобрена после рецензирования	26.01.2024	Approved after reviewing	26.01.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024