

УДК.629.7.067.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-35-49

Исследования по перестроению маршрута в процессе полета воздушного судна

М.А. Киселев^{1,2}, Ю.С. Калюжный², А.В. Карпов²,
С.Ф. Бородин¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²Федеральное автономное учреждение «Государственный
научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва, Россия

Аннотация: Публикацией данной статьи авторы продолжают исследования в части разработки и апробации методики перестроения маршрута воздушного судна в процессе его выполнения, начатые в ранее опубликованных статьях в «Научном Вестнике МГТУ ГА». В данной статье приводятся результаты исследования в части расширения возможностей методики от реконфигурации маршрута полета для гипотетического воздушного судна и препятствий в горизонтальной плоскости, которые были продемонстрированы ранее, до перестроения маршрута полета как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости для двух различных типов препятствий: 1) наземного естественного или искусственного (гора, опора ЛЭП и т. п.); 2) воздушного (грозового фронта, запретная область полета и т. п.) и их сочетания на примере полета по маршруту вертолета типа Ми-8 с использованием реальной цифровой карты местности. Напомним, что, как было отмечено ранее, большое количество авиационных происшествий связано с потерей управления в полете, а также со столкновением с землей в управляемом полете (категории LOC-I, CFIT, LALT). В результате расследования данных авиационных происшествий выявлено, что зачастую указанные авиационные происшествия обусловлены необходимостью быстрого изменения маршрута полета вследствие выявления на пути следования воздушного судна препятствий, например грозового фронта. При определении альтернативных маршрутов облета возникшего препятствия, а также в процессе реализации выбранного маршрута облета экипаж совершает ошибки ввиду повышенной психофизиологической нагрузки и дефицита времени. Предлагаемая авторами методика и алгоритмы позволяют оценить безопасность исходного маршрута, рассчитать варианты альтернативных маршрутов облета обнаруженных в процессе полета препятствий, проверить их на реализуемость с учетом летно-технических характеристик воздушного судна, ограничений на управляющие параметры, а также выбрать среди найденных маршрутов облета оптимальный с точки зрения какого-либо критерия, например исходя из минимизации увеличения протяженности маршрута полета, сокращения дополнительных затрат топлива, времени, необходимого на реализацию нового маршрута полета и т. д.

Ключевые слова: маршрут полета, облет препятствий, безопасность полета, синтез управления, ограничение на управление, топливная эффективность.

Для цитирования: Киселев М.А. Исследования по перестроению маршрута в процессе полета воздушного судна / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, С.Ф. Бородин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 35–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-35-49

Studies on in-flight aircraft rerouting

M.A. Kiselev^{1,2}, Y.S. Kalyuzhny², A.V. Karpov², S.F. Borodkin¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

²FAO "State Research Institute of Aviation Systems", Moscow, Russia

Abstract: With the publication of this article, the authors continue the research on the development and testing of a methodology for in-flight aircraft rerouting which have begun in previously published articles in the Civil Aviation High Technologies of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. This article presents the results of the study in terms of developing the potentials of the methodology from reconfiguring a route of a hypothetical aircraft and obstacles in the horizontal plane, which were

previously demonstrated, prior to rerouting in both the horizontal and vertical planes for two different types of obstacles: 1) ground natural or artificial (mountain, power line support, etc.); 2) air (squall line, prohibited flight area, etc.) and their combinations using an example of a Mi-8 helicopter flight on route using a real digital map of the terrain. As mentioned above, a large amount of aviation accidents is associated with the loss of control in-flight, as well as the collision with terrain in a controlled flight (categories LOC-I, CFIT, LALT). As a result of the investigation of the aviation accidents, it was found that these accidents are often caused by the requirement to reroute quickly due to obstacles, for example, a squall line. When determining alternatives to avoid an obstacle, as well as while implementing the selected route for avoiding action, the crew makes errors due to the increased psychophysiological load and lack of time. The methodology and the algorithms, proposed by the authors, make it possible to assess the safety of an original route, estimate options for alternatives to avoid around obstacles detected in-flight, check them for feasibility, taking into account aircraft performance, flight envelope, and also select the optimal route from the view of some criterion, for example, based on minimizing the route length increase, reducing additional fuel consumption, the time required to implement a new route of flight, etc.

Key words: route, obstacle avoidance, flight safety, control synthesis, flight envelope, fuel efficiency.

For citation: Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Y.S., Karpov, A.V., Borodkin, S.F. (2024). Studies on in-flight aircraft rerouting. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 35–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-35-49

Введение

Данная работа представляет собой логическое развитие ранее опубликованной статьи [1], и потому мы предоставляем некоторое краткое повторение информации из предыдущей работы в части актуальности исследований и ключевых положений методики, с тем чтобы облегчить понимание содержания данной статьи без необходимости обращения к предыдущим текстам.

Из статистики авиационных происшествий за период с 2011 по 2020 год¹ в Российской Федерации следует, что при выполнении полетов наибольшее количество авиационных происшествий связано со следующими группами событий:

- столкновение с препятствиями при полете на малой высоте (LALT);
- потеря управления в полете (LOC-I);
- столкновение с землей в управляемом полете (CFIT);
- попадание в приборные метеоусловия, к которым экипаж не допущен (UIMC);
- попадание в зону сильной грозовой деятельности (WSTRW).

Общая статистика авиационных происшествий/катастроф по коммерческой авиации и авиации общего назначения приведена в табл. 1.

Из приведенных выше данных очевидна актуальность создания инструмента оперативного, в том числе и в процессе полета, автоматического перестроения маршрута полета, интегрированного в систему самолето-вождения воздушного судна и обеспечивающего:

1) формирование нескольких альтернативных маршрутов [2], позволяющих облететь препятствия в виде наземных естественных [3], искусственных объектов [4, 5] или грозового фронта [6] на безопасном расстоянии в автоматическом или в директорном режимах с учетом летно-технических характеристик воздушного судна;

2) выявление оптимальных с точки зрения заданных критериев [7] (минимальное боковое отклонение, дополнительные затраты времени, топлива относительно исходного маршрута полета и т. п.) маршрутов облета.

Данный инструмент должен способствовать исключению ошибок экипажа, возникающих из-за повышенной психофизиологической нагрузки [8, 9] и дефицита времени [10] при выборе альтернативного маршрута полета в случае возникновения препятствия во время полета.

¹ Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2020 году. Управление инспекции по безопасности полетов [Электронный ресурс] // ФАВТ, 2021. 97 с. URL: https://aviaforum.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/data/attachment-files/2021/04/1598384_a3450354b90aa72fe5588472bb4eedfc.pdf (дата обращения: 20.12.2023).

Таблица 1
Table 1

Данные об авиационных происшествиях в Российской Федерации за 2011–2020 гг.
Data on aviation accidents in the Russian Federation for 2011–2020

	коммерческая авиация, %		авиация общего назначения, %	
	самолеты	вертолеты	самолеты	вертолеты
Столкновение с препятствиями при полете на малой высоте (LALT)	–/–	–/3,3	10/11	11,2/10,7
Потеря управления в полете (LOC-I)	18/–	17,4/13,3	44/22	14,1/17,4
Столкновение с землей в управляемом полете (CFIT)	9/16,7	43,5/13,3	6,4/4,2	24/13
Попадание в приборные метеоусловия, к которым экипаж не допущен (UIMC)	4,5/5,6	–/–	–/–	–/–
Попадание в зону сильной грозовой деятельности (WSTRW)	–/5,6	–/–	–/–	–/–

Постановка задачи

Исходные данные:

1) маршрут полета в виде координат точек маршрута $X_i(x_{gi}, y_{gi}, z_{gi})$ в нормальной земной системе координат [11]:

- начальной X_0 ;
- промежуточных (поворотных) $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}$;
- конечной X_n ;

2) ограничение по минимальной высоте полета над поверхностью Земли (в расчетах принято 100 м);

3) допустимое отклонение от маршрута полета (в расчетах принято 200 м);

4) препятствия (наземные, в виде грозового фронта, запретной зоны полетов) в виде массива координат точек их ограничивающих поверхностей $X_{пр1}, \dots, X_{прm}$.

5) карта местности типа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)² с разрешением 30 м (рис. 1);

6) воздушное судно типа Ми-8 со следующими характеристиками и ограничениями [12]:

- эксплуатационный диапазон изменения нормальной перегрузки $-0,5 \dots 2,5$;
- эксплуатационный диапазон изменения угла крена $-30 \dots 30^\circ$;
- максимальная скорость изменения перегрузки не более 1 ед/с;
- максимальная скорость полета по маршруту 240 км/ч;
- минимальная скорость горизонтального полета 70 км/ч;
- допустимый диапазон крена $-30 \dots 30^\circ$;
- максимальная скорость изменения крена 24 градуса/с.

Необходимо:

1) оценить безопасность исходного маршрута полета исходя из минимально допустимого расстояния между маршрутом полета и препятствием в процессе полета и, если исходный маршрут полета не безопасен, рассчитать альтернативные безопасные маршруты полета из начальной в конечную точку маршрута;

2) определить возможные скорости полета по альтернативным безопасным маршрутам;

3) выбрать альтернативный безопасный маршрут, оптимальный по установленному критерию.

² SRTM Database [Электронный ресурс] // dwtkns.com. URL: <https://dwtkns.com/srtm30m/> (дата обращения: 20.12.2023).

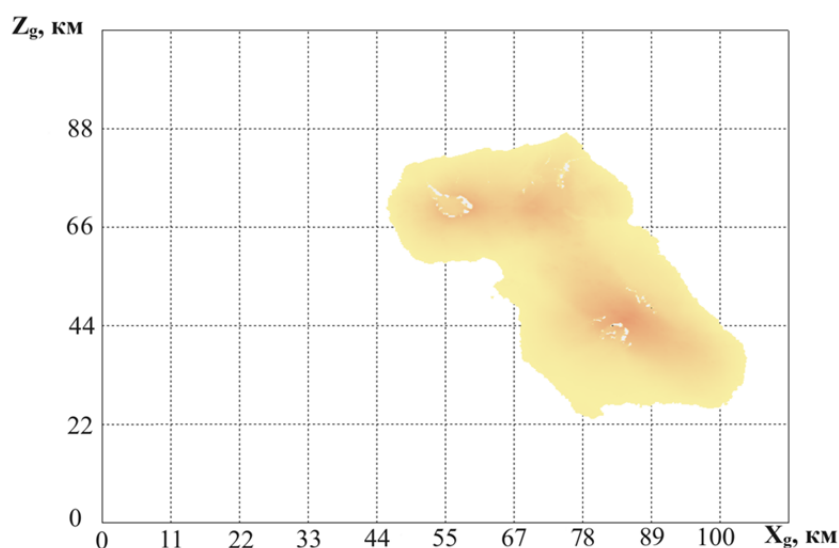


Рис. 1. Цифровая карта местности
Fig. 1. The digital map of the terrain

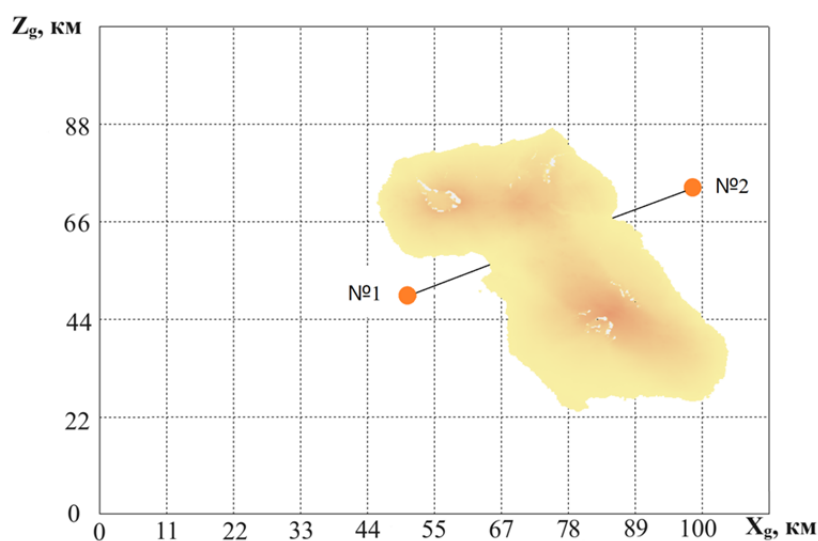


Рис. 2. Маршрут полета на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости
Fig. 2. The route on a digital terrain map in a horizontal plane

Выше дана общая формулировка задачи исследования. Далее представлено содержание начальных и конечных условий пяти решаемых задач.

Задача 1: построить маршрут облета препятствия в горизонтальной плоскости для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 2), высота полета 300 м, критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Задача 2: построить маршрут облета препятствия в вертикальной плоскости для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 3), исходная высота полета 300 м, критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Задача 3: построить маршрут облета в горизонтальной плоскости грозового фронта, представленного в виде нескольких многоугольников, расположенных друг над другом

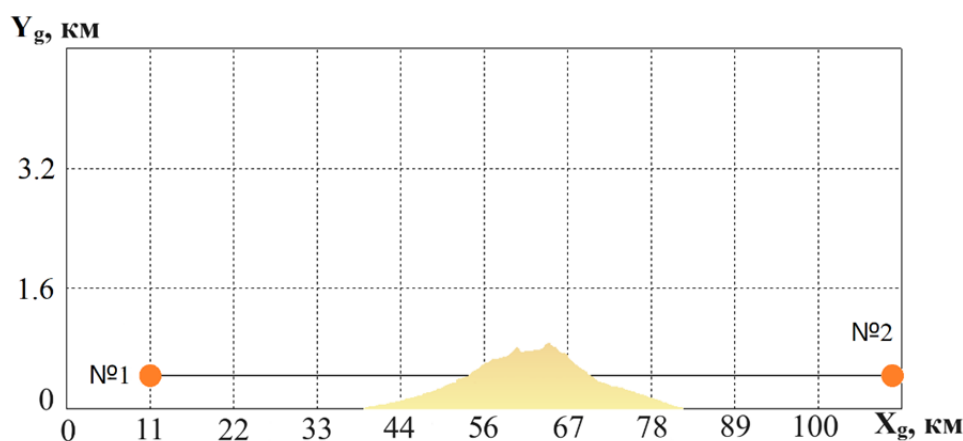


Рис. 3. Маршрут полета на цифровой карте местности в вертикальной плоскости
Fig. 3. The route on a digital terrain map in a vertical plane

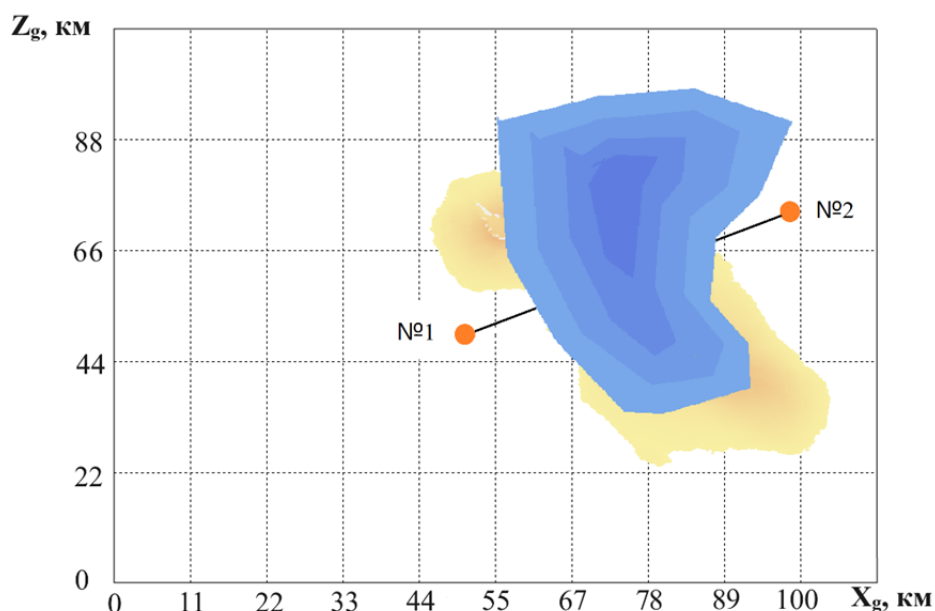


Рис. 4. Маршрут на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости с грозовым фронтом на высотах 2000...4000 м

Fig. 4. The route on a digital terrain map in a horizontal plane with a squall line at altitudes of 2000...4000 meters

на высотах 2000...4000 м для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 4), исходная высота полета 2500 м, критерий – минимальное время полета по маршруту.

Задача 4: построить маршрут облета в вертикальной плоскости грозового фронта, представленного в виде нескольких многоугольников, расположенных друг над другом на высотах 2000...4000 м, для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точ-

ками (рис. 5), исходная высота полета 2500 м, критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Задача 5: построить маршрут облета в горизонтальной плоскости грозового фронта, представленного в виде нескольких многоугольников, расположенных друг над другом на высотах 1600...3500 м, для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 6), исходная высота полета 2000 м, нижний край грозового фронта касается зем-

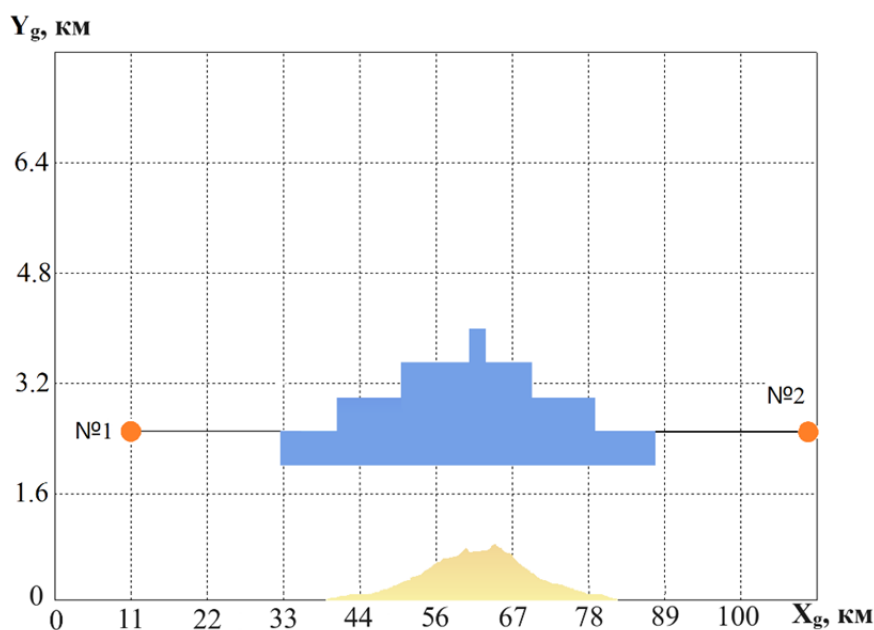


Рис. 5. Маршрут на цифровой карте местности в вертикальной плоскости с грозовым фронтом на высотах 2000...4000 м

Fig. 5. The route on a digital terrain map in a vertical plane with a squall line at altitudes of 2000...4000 meters

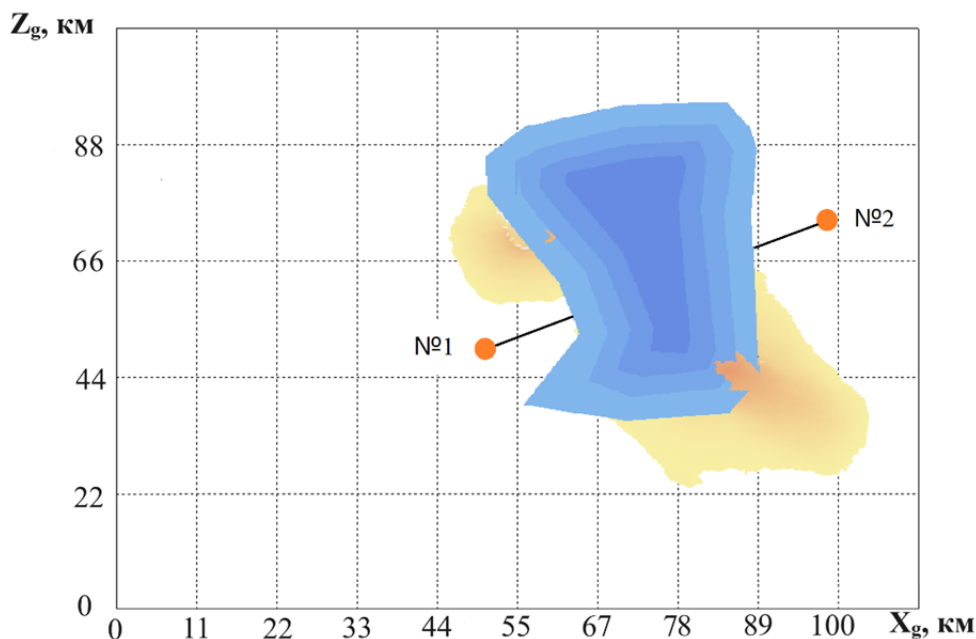


Рис. 6. Маршрут на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости с грозовым фронтом на высотах 1600...3500 м

Fig. 6. The route on a digital terrain map in a horizontal plane with a squall line at altitudes of 1600...3500 meters

ной поверхности. Критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Задача 6: построить маршрут облета в вертикальной плоскости грозового фронта, представленного в виде нескольких многоуголь-

ников, расположенных друг над другом на высотах 1600...3500 м для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 7), исходная высота полета 2000 м, нижний край грозового фронта местами каса-

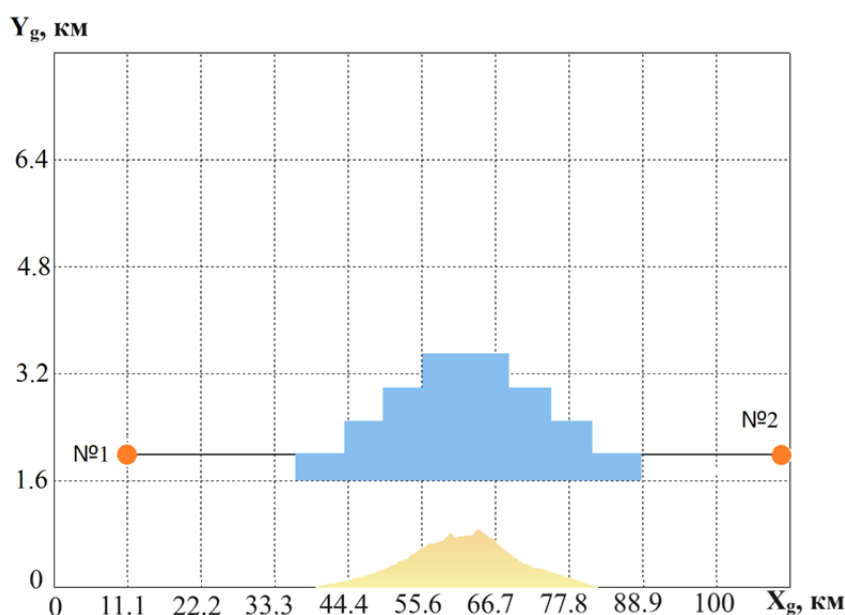


Рис. 7. Маршрут на цифровой карте местности в вертикальной плоскости с грозовым фронтом на высотах 1600...3500 м

Fig. 7. The route on a digital terrain map in a vertical plane with a squall line at altitudes of 1600...3500 meters

ется земной поверхности (рис. 6). Критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Методология исследования

Методика перестроения маршрута воздушного судна в процессе его выполнения предполагает определенную последовательность действий:

- 1) оценку исходного маршрута полета на безопасность;
- 2) оценку реализуемости маршрута;
- 3) расчет альтернативных безопасных маршрутов полета;
- 4) выбор оптимального маршрута на основе установленного пилотом критерия [7];
- 5) согласование маршрута с диспетчером, ответственным за управление воздушным движением [13];
- 6) реализацию выбранного маршрута в автоматическом режиме или в директорном режиме [14].

Содержание методики подробно рассмотрено в [1].

Результаты исследований

Задача 1. Результаты решения задачи 1 в виде альтернативных безопасных маршрутов облета препятствия в горизонтальной плоскости представлены на рис. 8.

Альтернативные безопасные маршруты облета препятствий в горизонтальной плоскости имеют следующие характеристики:

- 1) маршрут 1 (выделен желтым цветом):
 - длина маршрута 80 544 м;
 - безопасная скорость полета по маршруту 79...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);
 - максимальное боковое отклонение от маршрута составило 172 м;
 - время прохождения маршрута 1 377 с;
- 2) маршрут 2 (выделен красным цветом):
 - длина маршрута 99 258 м;
 - максимальная безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
 - максимальное боковое отклонение от маршрута составило 172 м;

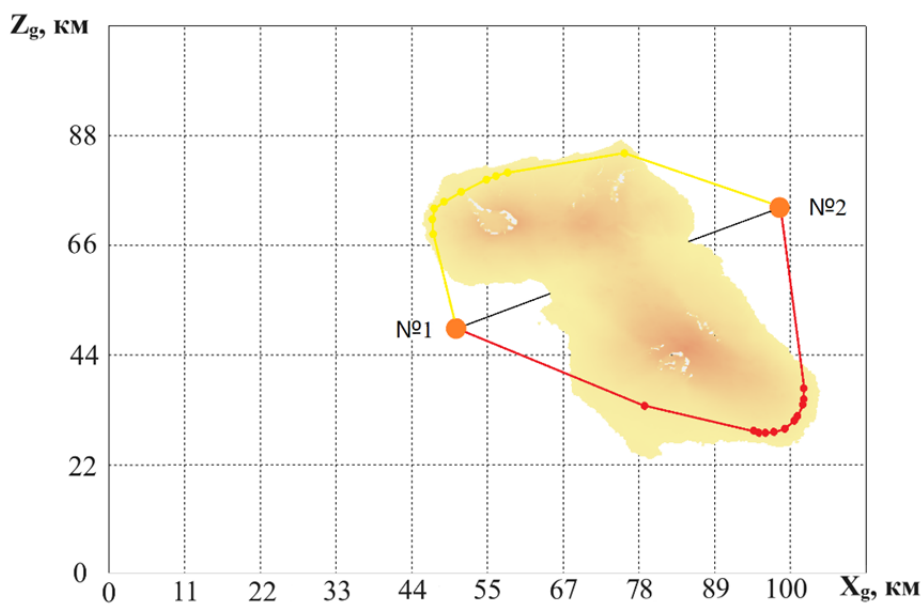


Рис. 8. Альтернативный маршрут полета на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости
Fig. 8. The alternative on a digital terrain map in a horizontal plane

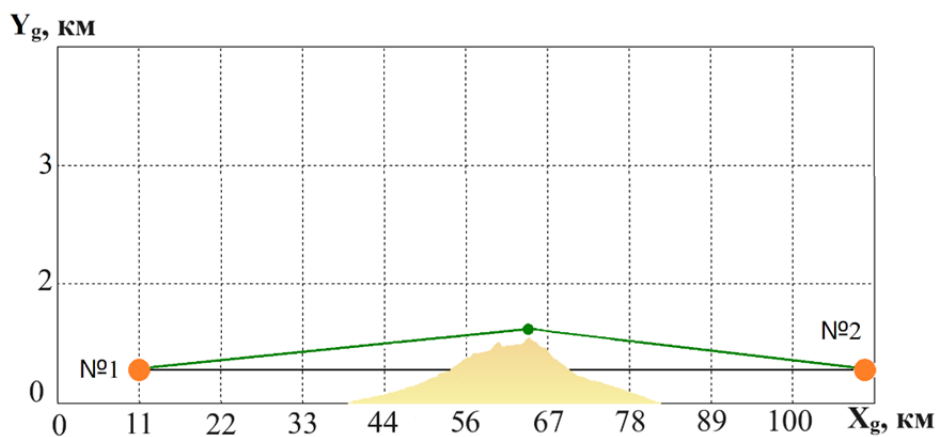


Рис. 9. Альтернативный маршрут полета на цифровой карте местности в вертикальной плоскости
Fig. 9. The alternative on a digital terrain map in a vertical plane

- время прохождения маршрута 1 489 с.

Задача 2. Результаты решения задачи 2 в виде альтернативного безопасного маршрута облета препятствия в вертикальной плоскости представлены на рис. 9.

Альтернативный безопасный маршрут облета препятствий в вертикальной плоскости имеет следующие характеристики:

- длина маршрута 53 559 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 215...240 км/ч (ограничения скорости по-

лета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);

- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 1 м;
- время прохождения маршрута 804 с.

Задача 3. Результаты решения задачи 3 в виде альтернативных безопасных маршрутов облета грозового фронта в горизонтальной плоскости представлены на рис. 10.

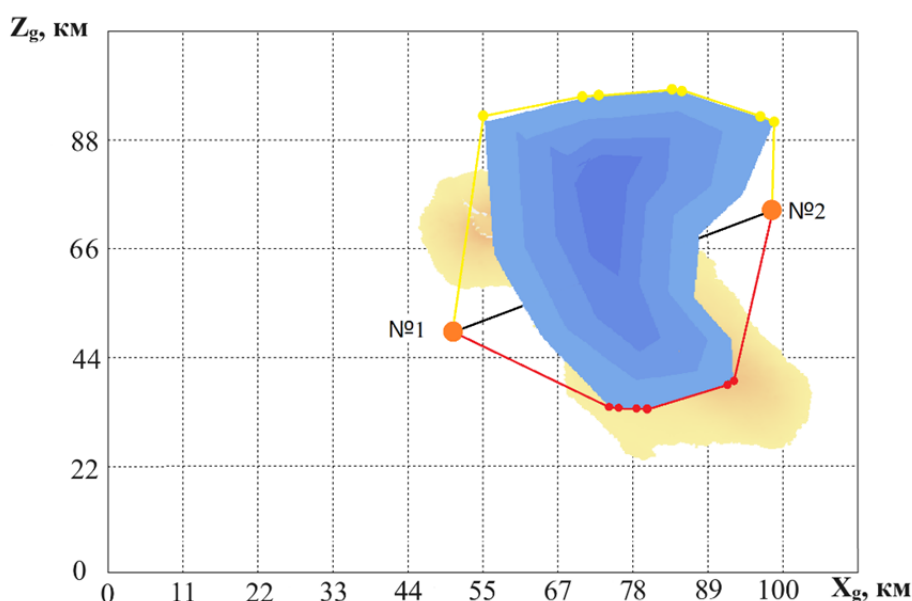


Рис. 10. Альтернативные маршруты полета на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости при облете грозового фронта

Fig. 10. The alternatives on a digital terrain map in a horizontal plane while avoiding a squall line

Альтернативные безопасные маршруты облета грозового фронта в горизонтальной плоскости имеют следующие характеристики:

1) маршрут 1 (обозначен желтым цветом):

- длина маршрута 107 360 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 99...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);
- время прохождения маршрута 1 824 с;
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 197 м. Отметим, что в случае ослабления требований к точности выдерживания маршрута время прохождения маршрута можно уменьшить. Например, при увеличении допустимого отклонения от маршрута до 700 м время полета уменьшится до 1 620 с;

2) маршрут 2 (обозначен красным цветом):

- длина маршрута 83 439 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 134...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);

- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 79 м;
- время прохождения маршрута 1 681 с;
- при увеличении допустимого отклонения от маршрута до 600 м время полета уменьшится до 1 254 с.

Задача 4. Результаты решения задачи 4 в виде альтернативного безопасного маршрута облета грозового фронта в вертикальной плоскости представлены на рис. 11.

Альтернативные безопасные маршруты облета грозового фронта в горизонтальной плоскости имеют следующие характеристики:

1) маршрут 1 (обозначен зеленым цветом):

- длина маршрута 53 559 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 1 м;
- время прохождения маршрута 804 с;

2) маршрут 2 (обозначен коричневым цветом):

- длина маршрута 53 656 м;

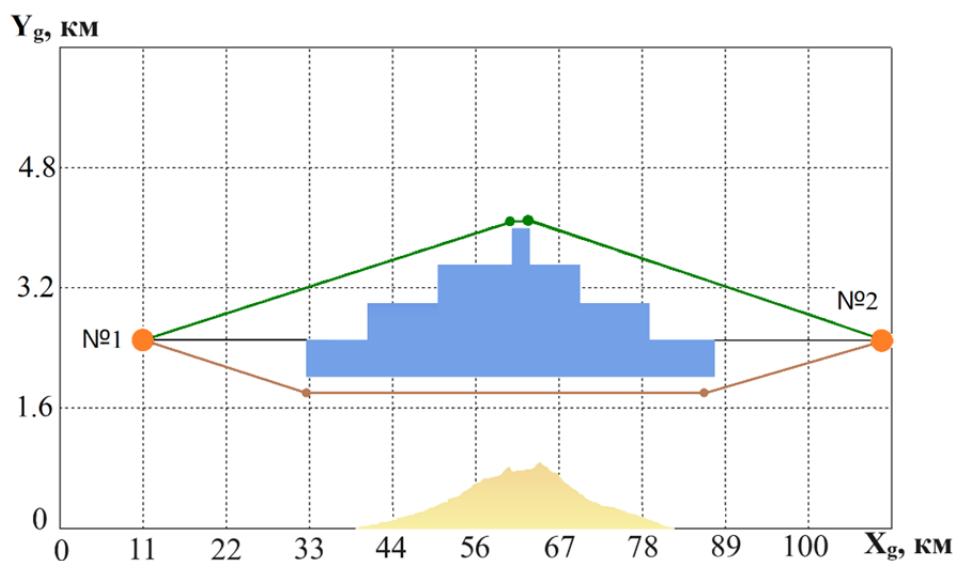


Рис. 11. Альтернативные маршруты полета на цифровой карте местности в вертикальной плоскости при облете грозового фронта на высотах 2000...4000 м

Fig. 11. The alternatives on a digital terrain map in a vertical plane while avoiding a squall line at altitudes of 2000...4000 meters

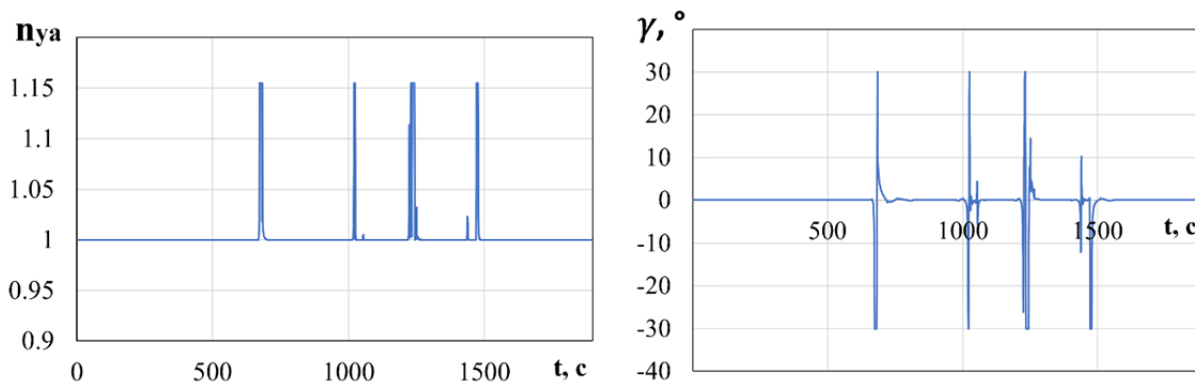


Рис. 12. График изменения нормальной перегрузки и угла крена при облете грозового фронта

Fig. 12. The graph of changes in normal overload and a bank angle while avoiding a squall line

- безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 2 м;
- время прохождения маршрута 805 с.

Управляющие параметры, необходимые для реализации маршрута 1, представлены на рис. 12.

Задача 5. Результаты решения задачи 5 в виде альтернативных безопасных маршрутов облета грозового фронта в горизонтальной плоскости представлены на рис. 13.

Альтернативные безопасные маршруты облета грозового фронта в горизонтальной плоскости имеют следующие характеристики:

1) маршрут 1 (обозначен желтым цветом):

- длина маршрута 98 618 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 119...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 193 м;
- время прохождения маршрута 1 548 с;

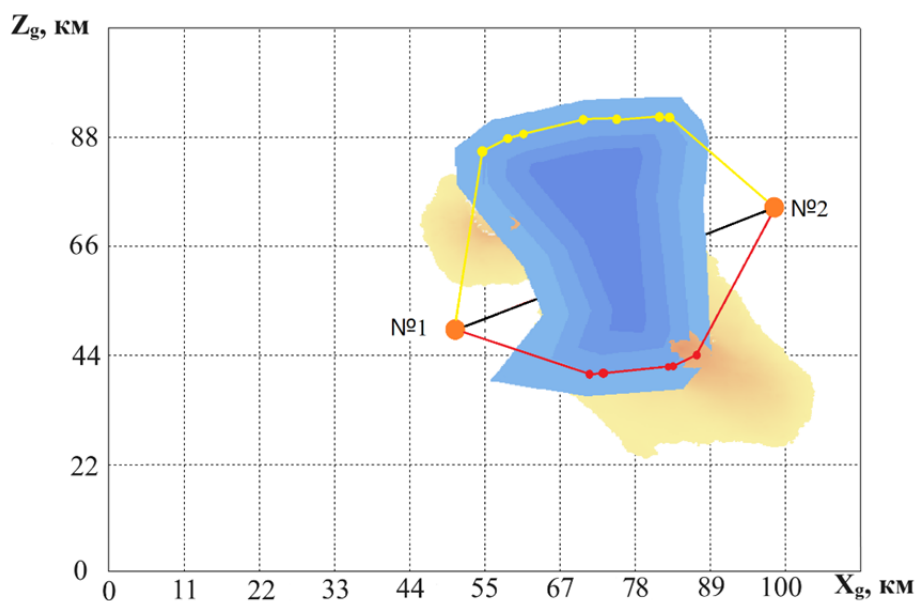


Рис. 13. Альтернативные маршруты полета на цифровой лог-карте местности в горизонтальной плоскости при облете грозового фронта на высотах 1600...3500 м

Fig. 13. The alternatives on a digital log map of the terrain in a horizontal plane while avoiding a squall line at altitudes of 1600...3500 meters

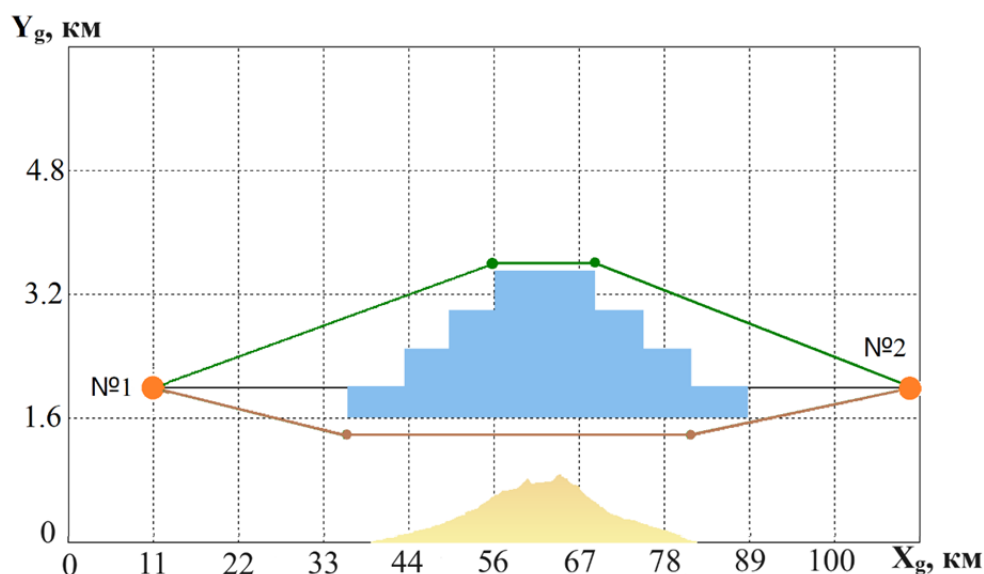


Рис. 14. Альтернативные маршруты полета на цифровой карте местности в вертикальной плоскости при облете грозового фронта на высотах 1600...3500 м

Fig. 14. The alternatives on a digital terrain map in a vertical plane while avoiding a squall line at altitudes of 1600...3500 meters

2) маршрут 2 (обозначен красным цветом):

- длина маршрута 70 803 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 119...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);

- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 180 м;
- время прохождения маршрута 1 453 с.

Задача 6. Результаты решения задачи 6 в виде альтернативных безопасных маршрутов облета грозового фронта в вертикальной плоскости представлены на рис. 14.

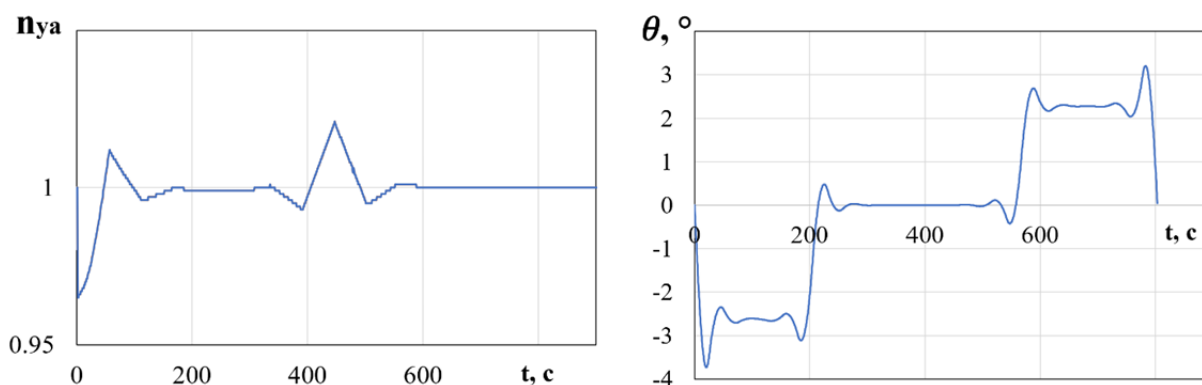


Рис. 15. График изменения нормальной перегрузки и угла наклона траектории при облете грозового фронта
Fig. 15. The graph of change in normal load factor and a flight path angle while avoiding a squall line

Альтернативные безопасные маршруты облета грозового фронта в вертикальной плоскости имеют следующие характеристики:

1) маршрут 1 (обозначен зеленым цветом):

- длина маршрута 53 559 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 1 м;
- время прохождения маршрута 804 с;

2) маршрут 2 (обозначен коричневым цветом):

- длина маршрута 53 656 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 2 м;
- время прохождения маршрута 805 с.

Управляющие параметры, необходимые для реализации маршрута 2, представлены на рис. 15.

Обсуждение результатов

Как следует из представленных выше результатов, алгоритм показал свою работоспособность при перестроении маршрута полета:

- в горизонтальной плоскости;

- в вертикальной плоскости;
- для случаев облета:
- естественных наземных препятствий;
- воздушных препятствий типа грозового фронта.

В частности, из представленного на рис. 6 и 7 грозового фронта и естественных наземных препятствий в виде рельефа местности, найденных альтернативных безопасных маршрутов полета, представленных на рис. 14, видно, что алгоритм работоспособен в том числе и в случае, когда для пролета имеется замкнутый «туннель», образованный земной поверхностью и поверхностью грозового фронта.

Исходя из результатов расчетов, приведенных в задаче 2, можно сделать вывод о том, что с точки зрения минимальной протяженности и времени прохождения в горизонтальной плоскости оптимальным является маршрут 1 (рис. 8), но при этом боковое отклонение от маршрута на нем составляет 175 м. Маршрут 2 имеет большую длину и требует больше времени на прохождение, но боковое отклонение в этом случае составляет всего 18 м. Альтернативный безопасный маршрут полета в вертикальной плоскости № 1 (рис. 9) по сравнению с маршрутами в горизонтальной плоскости выигрывает как по длине, так и по времени прохождения за счет более простой конфигурации (две прямые с одной поворотной точкой на маршруте), что позволяет достигать максимально разрешенную для используемого воздушного судна скорость полета маршрута. Аналогич-

ный вывод о преимуществе маршрутов облета в вертикальной плоскости по сравнению с маршрутами облета в горизонтальной плоскости можно сделать и исходя из результатов решения задач 3 и 4.

Выводы

В статье рассмотрено дальнейшее развитие ранее предложенного алгоритма, обеспечивающего на основе данных о текущем маршруте полета, координатах препятствий оценку безопасности реализуемого маршрута полета, расчет множества альтернативных безопасных и реализуемых данным воздушным судном маршрутов полета с выделением оптимального по выбранному критерию маршрута облета препятствий. В данном исследовании рассмотрено применение алгоритма для расчета вариантов облета препятствий в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Исследования проводились на основе реальной цифровой карты местности. Представленные в статье результаты решения тестовых задач показали работоспособность алгоритма для прокладки нового маршрута полета в случае появления наземного и (или) воздушного препятствия.

Список литературы

1. **Киселев М.А.** Методика перестроения маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, С.Ф. Бородин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 33–46. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-33-46
2. **Altun A.T., Hasanzade M., Saldiran E. et al.** AMU-LED cranfield flight trials for demonstrating the advanced air mobility concept [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 9. ID: 775. DOI: 10.3390/aerospace10090775 (дата обращения: 09.09.2023).
3. **Stevenson G.** Testing the helicopter obstacle avoidance system / G. Stevenson, H.R. Verdun, P.H. Stern, W. Koechner // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1995. Pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025
4. **Kahana A.** Obstacle-avoidance displays for helicopter operations: spatial versus guidance symbologies // Journal of Aerospace Computing, Information and Communication. 2015. Vol. 12, no. 7. Pp. 455–466. DOI: 10.2514/1.I010306
5. **Yang X., Wei P.** Autonomous free flight operations in urban air mobility with computational guidance and collision avoidance // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Vol. 22, no. 9. Pp. 5962–5975. DOI: 10.1109/TITS.2020.3048360
6. **Богаткин О.Г.** Основы авиационной метеорологии: учебник. СПб.: РГГМУ, 2009. 339 с.
7. **Левицкий С.В., Левицкая Е.В.** Методика оценки транспортной эффективности магистрального пассажирского самолета // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 99–106.
8. **Горбунов В.В.** Особенности изменения некоторых психофизиологических показателей летчика при различных режимах труда и отдыха в длительных полетах // Медицина труда и промышленная экология. 2009. № 5. С. 5–9.
9. **Лысаков Н.Д.** Психологические аспекты человеческого фактора в авиации // Вестник университета. 2014. № 2. С. 250–253.
10. **Шумилов И.С.** Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 384 с.
11. **Левицкий С.В., Свиридов Н.А.** Динамика полета: учебник для вузов. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 527 с.
12. **Володко А.М.** Основы аэродинамики и динамики полета вертолета. М.: Транспорт, 1988. 342 с.
13. **Ahrenhold N.** Enabling green approaches by FMS-AMAN coordination / N. Ahrenhold, I. Stasicka, R. Abdellaoui, T. Mühlhausen, M.-M. Temme [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 3. P. 278. DOI: 10.3390/aerospace10030278/ (дата обращения: 04.01.2023).
14. **Eger T.W.** Operational requirements for helicopter operations low-level in degraded vis-

ual environment [Электронный ресурс] // Proceedings-SPEI. The International Society for Optical Engineering. 2013. Vol. 8737. DOI: 10.1117/12.2015311 (дата обращения: 09.09.2023).

References

1. Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Y.S., Karpov, A.V., Borodkin, S.F. (2023). Methodology for plotting the flight planned route change of the aircraft in flight. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 6, pp. 33–46. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-33-46
2. Altun, A.T., Hasanzade, M., Saldiran, E. et al. (2023). AMU-LED cranfield flight trials for demonstrating the advanced air mobility concept. *Aerospace*, vol. 10, issue 9, ID: 775. DOI: 10.3390/aerospace10090775 (accessed: 09.09.2023).
3. Stevenson, G., Verdun, H.R., Stern, P.H., Koechner, W. (1995). Testing the helicopter obstacle avoidance system. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025
4. Kahana, A. (2015). Obstacle-avoidance displays for helicopter operations: spatial versus guidance symbologies. *Journal of Aerospace Computing, Information and Communication*, vol. 12, no. 7, pp. 455–466. DOI: 10.2514/1.1010306
5. Yang, X., Wei, P. (2021). Autonomous free flight operations in urban air mobility with computational guidance and collision avoidance. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 9, pp. 5962–5975. DOI: 10.1109/TITS.2020.3048360

6. Bogatkin, O.G. (2009). Fundamentals of aviation meteorology: Textbook. St. Petersburg: RGGMU, 339 p. (in Russian)

7. Levickiy, S.V., Levickaya, E.V. (2014). The methods of assessment of transportation efficiency of a passenger aircraft. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 205, pp. 99–106. (in Russian)

8. Gorbunov, V.V. (2009). Peculiarities of some psycho-physiologic parameters change in pilots experiencing variable work and rest modes in long flights. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, no. 5, pp. 5–9. (in Russian)

9. Lyssakov, N.D. (2014). Psychological aspects of human factor in aviation. *Vestnik Universiteta*, no. 2, pp. 250–253. (in Russian)

10. Shumilov, I.S. (2006). Aviation incidents. Causes and prevention options. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 384 p. (in Russian)

11. Levitskiy, S.V., Sviridov, N.A. (2008). Flight dynamics: Textbook for Universities. Moscow: VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, 527 p. (in Russian)

12. Volodko, A.M. (1988). Fundamentals of aerodynamics and helicopter flight dynamics. Moscow: Transport, 342 p. (in Russian)

13. Ahrenhold, N., Stasicka, I., Abdel-laoui, R., Mühlhausen, T., Temme, M.-M. (2023). Enabling green approaches by FMS-AMAN coordination. *Aerospace*, vol. 10, issue 3, p. 278. DOI: 10.3390/aerospace10030278/ (accessed: 04.01.2023).

14. Eger, T.W. (2013). Operational requirements for helicopter operations low-level in degraded visual environment. In: *Proceedings-SPEI. The International Society for Optical Engineering*, vol. 8737. DOI: 10.1117/12.2015311 (accessed: 09.09.2023).

Сведения об авторах

Киселев Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, m.kiselev@mstuca.aero.

Калюжный Юрий Сергеевич, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС», yury.kalyuzhny@gmail.com.

Карпов Андрей Викторович, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС», ya.karanvik@gmail.com.

Бородин Сергей Филиппович, кандидат технических наук, доцент кафедры аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, s.borodkin@mstuca.aero.

Information about the authors

Mikhail A. Kiselev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, m.kiselev@mstuca.aero.

Yury S. Kalyuzhny, Lead Engineer of the State Research Institute of Aviation Systems, yury.kalyuzhny@gmail.com.

Andrey V. Karpov, Lead Engineer of the State Research Institute of Aviation Systems, ya.karanvik@gmail.com.

Sergey F. Borodkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.borodkin@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	26.12.2023	Received	26.12.2023
Одобрена после рецензирования	30.01.2024	Approved after reviewing	30.01.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024