

Алгоритм и программа для оценки уровня безопасности полета самолета в турбулентной атмосфере на этапе предварительного проектирования

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
„Харьковский авиационный институт”*

Проведен анализ влияния атмосферной турбулентности на безопасность полета самолета. Предложены теоретическая методика и алгоритм для оценки влияния турбулентности на безопасность полета самолета. Предложен вариант программного обеспечения для оценки уровня безопасности полетов самолета в турбулентной атмосфере на этапе предварительного проектирования.

Ключевые слова: безопасность полетов, атмосферная турбулентность, алгоритм, программное обеспечение, предварительное проектирование.

Введение

К опасным неблагоприятным условиям полета относится турбулентность атмосферы. По данным Федерального авиационного управления (FAA) США, именно турбулентность является главной причиной травм, которые помимо как в инцидентах со смертельными исходами, получают пассажиры и бортпроводники. В период времени с 1980 по 2008-й годы американские авиакомпании сообщили о 234 случаях турбулентности, достаточно сильной, чтобы охарактеризовать ее как «происшествие». Серьезно пострадали 298 человек, трое – погибли. Между 2009 и 2011 годами турбулентность нанесла разного рода травмы 147 пассажирам и членам экипажа авиалайнеров. Согласно статистике [1], начиная с 1980 года в мире было зафиксировано шесть летных происшествий, вызванных турбулентностью. Они унесли жизни 17 человек.

Помимо неблагоприятного воздействия на пассажиров и экипаж турбулентность может привести к выходу самолёта на неустойчивые режимы полёта, а также к усталостному повреждению или полному разрушению конструкции.

Турбулентность как внешний фактор, влияющий не только на безопасность полета, но и на конструкцию самолета в целом, должен быть учтен еще на самых ранних этапах – на этапе предварительного проектирования самолета. В Нормах лётной годности (НЛГ) существуют требования о необходимости учёта влияния турбулентности на летательный аппарат.

Для определения соответствия требованиям НЛГ можно использовать экспериментальные и расчетные методы. Физическое моделирование влияния атмосферной турбулентности на летательный аппарат (ЛА) представляет собой весьма длительный и дорогостоящий процесс, а также ограничено из-за своих возможностей в воспроизведении явления в полном объеме [2]. Более широкими возможностями обладает математическое моделирование, которое имеет неоспоримые преимущества [3]:

- позволяет с помощью одного компьютера со специализированным программным комплексом осуществлять решение целого класса задач, имеющих одинаковое математическое описание;
- обеспечивает простоту перехода от одной задачи к другой путем изменения

значений параметров исследуемой системы;

- благодаря декомпозиции дает возможность моделировать систему по частям и исследовать отдельные факторы.

Создание программного обеспечения, позволяющего оценить уровень безопасности полета в условиях воздействия атмосферной турбулентности на ЛА еще на этапе предварительного проектирования, является в настоящее время актуальной задачей.

1. Математическая модель турбулентности

С помощью многолетних наблюдений были созданы различные модели турбулентной атмосферы. Например, в работах [4] и [5] авторами было установлено, что пульсация скорости и давления в турбулентном потоке представляет собой случайный процесс и поэтому может быть описана математическим аппаратом случайных функций. Согласно этому утверждению для описания поведения самолета при полете в турбулентной атмосфере достаточно знать математическое ожидание и корреляционную функцию случайного процесса. В соответствии с изложенным выше утверждением, предполагают, что в пределах достаточно больших областей атмосферы турбулентность стационарна, поэтому:

- математическое ожидание и дисперсия скорости порывов не зависят от координаты рассматриваемой точки для вертикальных порывов, оказывающих наибольшее влияние на поведение самолета;
- корреляционная функция зависит только от расстояния между рассматриваемыми точками и не зависит от их абсолютных координат.

Для корреляционной функции авторами работы [6] экспериментально получена следующая зависимость:

$$R(r) = \sigma_w^2 \cdot \left(1 - \frac{r}{2 \cdot L}\right) \cdot e^{-\frac{r}{L}}, \quad (1)$$

где σ_w – среднеквадратическое значение скорости порывов;

r – расстояние между рассматриваемыми точками, м;

L – характерный размер, называемый масштабом турбулентности, м.

Для каждого фиксированного значения $r=r_0$ случайная функция превращается в случайную величину. Она принимает значения w_1, w_2, \dots . В работе [6] также отмечено, что одномерный закон распределения значений w для атмосферной турбулентности – нормальный:

$$f(w) = \frac{1}{w\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{w}{\sigma_w}\right)^2}. \quad (2)$$

Используя изложенные представления об атмосферной турбулентности, строят ее общую модель. При этом предполагают следующее [7]:

- атмосфера представляет собой совокупность спокойных участков и турбулентных зон со случайно изменяющимися размерами;
- в турбулентных зонах изменение по времени составляющих скоростей порывов воздуха является стационарным процессом с дисперсией, меняющейся от зоны к зоне;

- в общем виде турбулентность представляет собой случайный локально-нормальный процесс;
- турбулентность атмосферы считается изотропной.

«Степень засоренности» турбулентными зонами характеризуется относительным временем полета в турбулентных областях P , которое можно рассматривать как вероятность события, заключающегося в том, что ЛА пролетит через область атмосферной турбулентности при продолжительности полета, равной 1 ч. Все области можно представить двумя видами турбулентности: «слабой» и «сильной», характеризующимися своими значениями P_i и b_i [7].

Предполагают, что структура и параметры турбулентной атмосферы не зависят от времени суток и года, широты, долготы и рельефа местности, над которой пролетает ЛА, но зависят от высоты полета [7]. Параметры одной из возможных моделей турбулентной атмосферы приведены в таблице.

Модель турбулентности [7]

H, м	L, м	Турбулентность			
		слабая		сильная	
		P_1	b_1	P_2	b_2
0	150	$9,950 \cdot 10^{-1}$	1,200	$5,000 \cdot 10^{-3}$	2,580
300	300	$9,950 \cdot 10^{-1}$	1,200	$5,000 \cdot 10^{-3}$	2,580
1000	300	$3,358 \cdot 10^{-1}$	1,045	$2,300 \cdot 10^{-3}$	2,460
2000	300	$1,750 \cdot 10^{-1}$	1,067	$1,150 \cdot 10^{-3}$	2,743
3000	300	$1,098 \cdot 10^{-1}$	1,068	$5,874 \cdot 10^{-4}$	2,939
4000	300	$7,080 \cdot 10^{-2}$	1,034	$3,686 \cdot 10^{-4}$	3,135
5000	300	$5,110 \cdot 10^{-2}$	1,012	$2,310 \cdot 10^{-4}$	3,287
6000	300	$4,046 \cdot 10^{-2}$	$9,906 \cdot 10^{-1}$	$1,450 \cdot 10^{-4}$	3,450
7000	400	$2,780 \cdot 10^{-2}$	$9,633 \cdot 10^{-1}$	$1,150 \cdot 10^{-4}$	3,570
8000	400	$2,208 \cdot 10^{-2}$	$9,470 \cdot 10^{-1}$	$9,800 \cdot 10^{-5}$	3,620
9000	400	$1,670 \cdot 10^{-2}$	$9,250 \cdot 10^{-1}$	$8,930 \cdot 10^{-5}$	3,516
10000	400	$1,260 \cdot 10^{-2}$	$9,035 \cdot 10^{-1}$	$8,520 \cdot 10^{-5}$	3,157

Из таблицы следует, что вблизи земли атмосфера практически всегда неспокойна. На больших высотах вероятность встречи турбулентных зон уменьшается. Сильная турбулентность встречается намного реже, чем слабая.

2. Методика расчета

Как положительные, так и отрицательные значения перегрузок ограничены по условиям безопасности полета: по прочности или по сваливанию. Обозначим предельные положительные и отрицательные перегрузки через n_{y1} и n_{y2} , а соответствующие им приращения – через $\Delta n_{y1} = n_{y1} - 1$ и $\Delta n_{y2} = 1 - n_{y2}$ (рис. 1) [6].

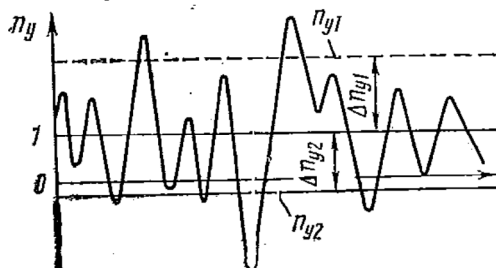


Рис. 1. Характер изменения перегрузки при полете самолета в турбулентной атмосфере [6]

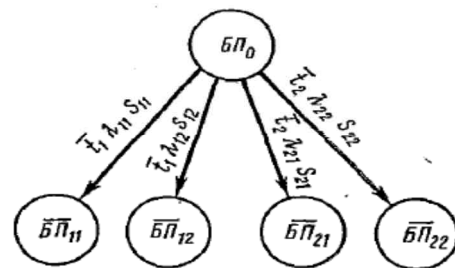


Рис. 2. Граф состояний при полете самолета в турбулентной атмосфере [6]

Вполне уместно предположить, что и после превышения перегрузки пилот может парировать его последствия с некоторой вероятностью, т. е. он возвращает систему в исходное состояние. Отсутствие парирования последствий выхода будет адекватно неблагоприятному исходу полета. Граф состояний для полета в болтанку с учетом сильной и слабой турбулентности показан на рис. 2.

$$\lambda_{00} = P_1 \cdot (\lambda_{11} \cdot s_{11} + \lambda_{12} \cdot s_{12}) + P_2 \cdot (\lambda_{21} \cdot s_{21} + \lambda_{22} \cdot s_{22}) \quad , \quad (3)$$

Здесь P_1 и P_2 – относительное время полета в условиях слабой и сильной турбулентности; λ_{11} , λ_{12} – интенсивности выходов перегрузки за предельные положительные, а λ_{21} и λ_{22} – отрицательные значения; s_{11} , s_{12} , s_{21} , s_{22} – вероятности непарирования пилотом последствий выходов перегрузки за предельные значения [6]. Они зависят от тяжести последствий. Например, при выходе перегрузки за разрушающие значения следует полагать $s_{11} = s_{12} = s_{21} = s_{22} = 1$ [6].

Зачастую при сравнительных расчетах вмешательством пилота в целях парирования болтаночных перегрузок пренебрегают (как, например, в работе [6]). Хотя на самом деле необходимо учитывать этот факт, который согласно расчетам может существенно повлиять на значение λ .

В пределах каждой отдельной области атмосферную турбулентность рассматривают, как стационарный случайный процесс ($\sigma_w = \text{const}$), поэтому для определения интенсивностей превышения перегрузки можно воспользоваться формулой Райса. Применительно к решаемой задаче для интенсивности превышения Δn_{y1} формулу Райса можно записать в виде [6,7]:

$$\lambda_{11}^* = \lambda_0 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta n_{y1}}{\sigma_{ny}} \right)^2} \quad , \quad (4)$$

где λ_{11}^* -- среднее число превышений за 1 с заданного уровня приращения перегрузки Δn_{y1} ;

σ_{ny} – среднее квадратическое значение Δn_y ;

λ_0 – математическое ожидание числа пересечений с положительным наклоном реализаций $n_y(t)$ нулевого уровня приращения перегрузки в 1 с (для отрицательного приращения перегрузки – те же пересечения, но с отрицательным наклоном кривой).

Согласно модели турбулентной атмосферы предполагают, что в условиях сильной или слабой турбулентности само значение σ_w является случайной величиной. Поэтому λ_{ij} нужно рассматривать как случайную величину, а среднее число превышений заданного уровня перегрузки Δn_{yi} должно определяться как математическое ожидание этой случайной величины [6,7].

Поскольку в атмосфере предполагается слабая и сильная турбулентность, а приращения перегрузок возможны как положительные, так и отрицательные, то для полной интенсивности выбросов получено следующее выражение [6], которое вполне соответствует стандарту [7]:

$$\lambda_{00} = \lambda_0 \cdot \left[P_1 \cdot \left(e^{\frac{-\Delta n_{y1}}{B \cdot b_1}} \cdot s_{11} + e^{\frac{-\Delta n_{y2}}{B \cdot b_1}} \cdot s_{12} \right) + P_2 \cdot \left(e^{\frac{-\Delta n_{y1}}{B \cdot b_2}} \cdot s_{21} + e^{\frac{-\Delta n_{y2}}{B \cdot b_2}} \cdot s_{22} \right) \right] \quad .(5)$$

При этом

$$B = k \cdot \frac{C_y^\alpha \cdot \rho \cdot V \cdot S}{2 \cdot m \cdot g}, \quad (6)$$

где $k = \frac{\sqrt{1 - 1,5 \cdot \frac{n}{\beta}}}{1 - n / \beta}$; $n = \frac{-C_y^\alpha}{m \cdot V}$; m – масса самолета.

$$\lambda_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{A}{B}, \quad (7)$$

где $A = \sqrt{\frac{3}{b_a \cdot L}} \cdot v \cdot \frac{C_y^\alpha \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}{2 \cdot m \cdot g}$,

где v – коэффициент, учитывающий влияние переменности порывов и нестационарности обтекания, зависит от числа M полета и удлинения крыла. При $M < 1$ в широком диапазоне удлинений крыла можно принять $v = 0,4$ [6].

Уровень риска будем оценивать по числу превышений заданного уровня перегрузок, т.е. $Q = \lambda_{00}$.

3. Алгоритм расчета

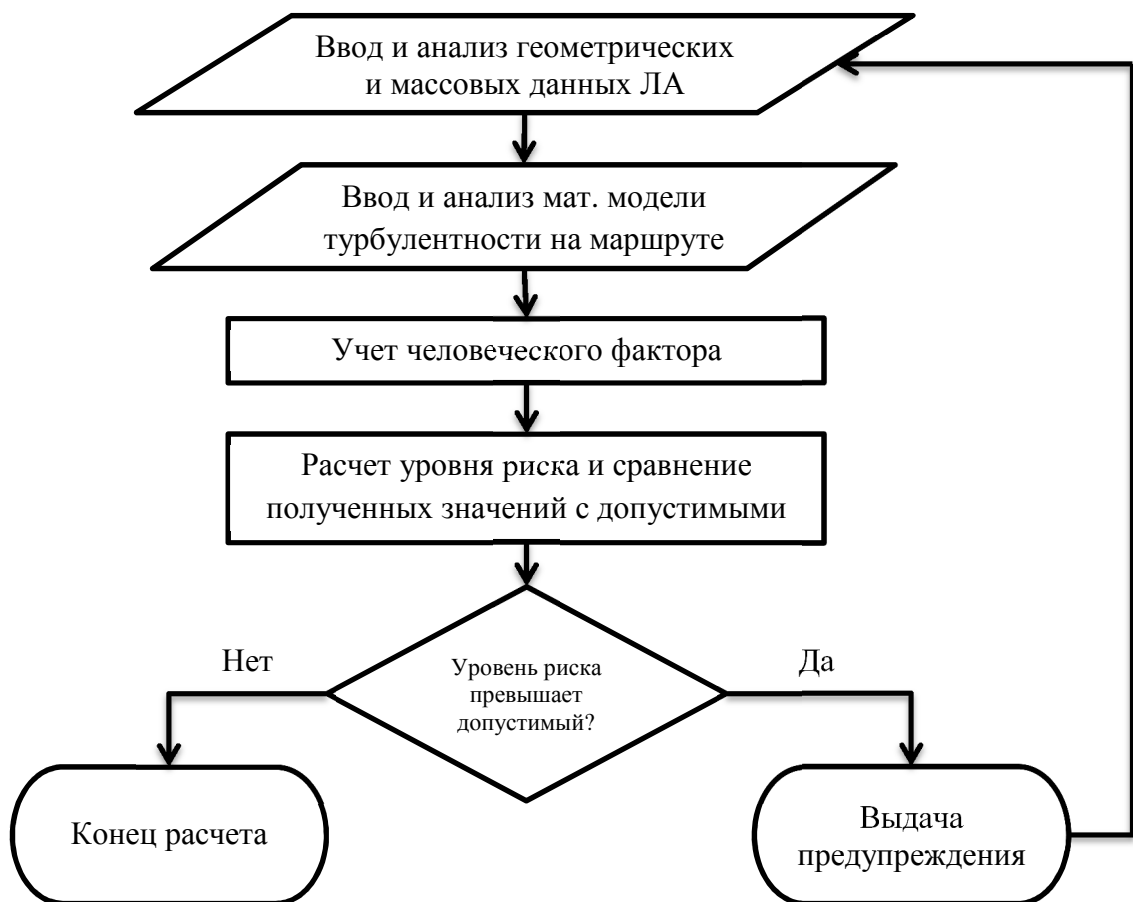


Рис. 3. Алгоритм оценки уровня риска

4. Объект исследования

В качестве объекта исследования был выбран легкий одномоторный пассажирский самолет Cessna-172 «Skyhawk».

Исходные данные для расчета [8]:

- Полетная масса самолета – 1043 кг.
- Максимальная и минимальная эксплуатационные перегрузки при заданной полетной массе: $n_{max}^{\vartheta} = 3,8$,
 $n_{min}^{\vartheta} = -1,52$.
- Площадь крыла – 16,2 м².
Средняя аэродинамическая хорда – $b_a=1,63$ м.



Рис. 4. Общий вид объекта исследования

- Производная коэффициента подъемной силы $C_y^{\alpha}=f(M)$, но с учетом малого диапазона скоростей условно можно принять $C_y^{\alpha} \sim 4,94$.

Расчет выполним для шести расчетных точек ($V=120,140\dots 220$ км/ч) и для трех высот ($H=0, 1000, 2000$ м).

5. Результаты расчета

На основании методики, изложенной в разделе 4, а также с учетом её модификации и собственных правок было создано программное обеспечение «SafeFlight».

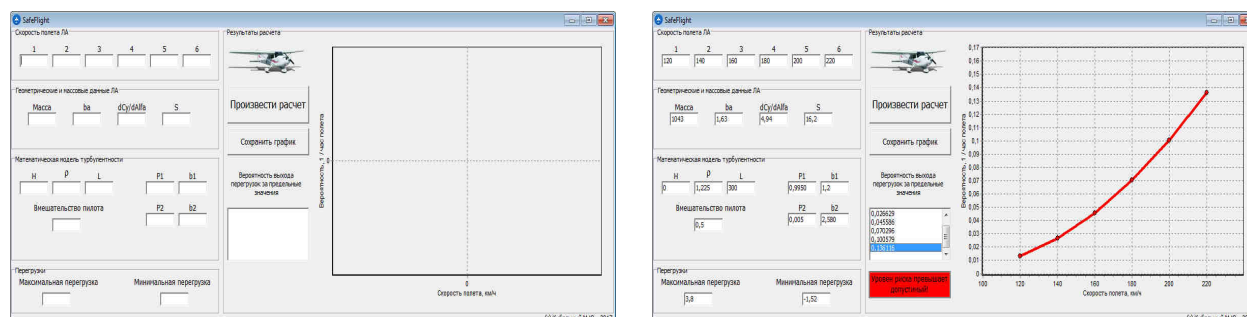


Рис. 5. Интерфейс программы «SafeFlight»

После ввода исходных данных необходимо нажать на кнопку «Провести расчет». После этого программа выводит результаты расчета в список а также строит график. График можно сохранить как рисунок путем нажатия на на кнопку «Сохранить график». Помимо этого, в случае если хотя бы одно из полученных значений превышает допустимый уровень вероятности возникновения усложненных условий полета (УУП) [9], загорается предупредительное табло «Уровень риска превышает допустимый!». Если же превышения отсутствуют, то загорается зеленое табло «Уровень риска не превышает допустимый!». При расчете предположим, что вероятность того, что пилот будет парировать болтаночные перегрузки, составит 50%. Это обусловлено скоростью реакции среднестатистического пилота на возмущение [10], а также ограничениями по

перегрузкам конкретного ЛА [8]. На легких самолетах также отсутствуют какие-либо автоматические системы по гашению колебаний, поэтому вероятность парирования болтаночных перегрузок зависит исключительно от скорости реакции летчика и не может достигать высоких показателей [11]. Результаты расчета приведем в виде сравнительного графика (рис. 6).

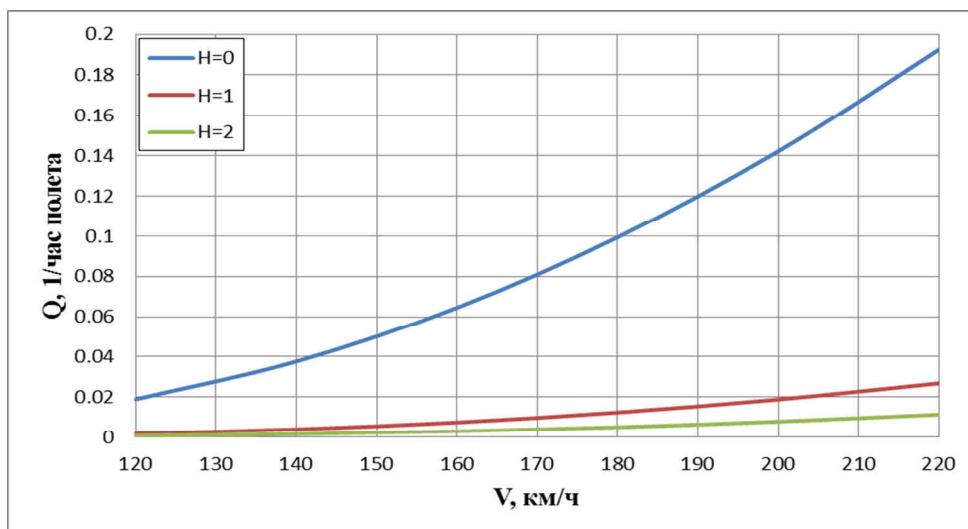


Рис. 6. Уровень риска для высот H=0,1,2 км

Результаты расчетов подтверждают: чем выше высота полета, тем меньше вероятность столкнуться с турбулентностью. При полете у земли на крейсерской скорости 200 км/ч $Q=0,141585$, т.е. на 7 часов полета следует ожидать в среднем одно превышение заданного уровня перегрузки. На крейсерской высоте полета $H=2000$ м, и скорости полета $V=200$ км/ч $Q=0,0079$, т.е. на 127 часов полета следует ожидать одно превышение заданного уровня нагрузки. Эти значения превышают допустимые [9].

Выводы

Следовательно, были предложены теоретическая методика и алгоритм для оценки влияния турбулентности на безопасность полета самолета. Предложен вариант программного обеспечения для оценки уровня безопасности полетов в турбулентной атмосфере на этапе предварительного проектирования. Методика и ПО были успешно апробированы на реально существующем ЛА.

Список литературы

1. Авиационные происшествия, вызванные турбулентностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.airsafe.com/events/turb.htm>
2. Морозов, В.И. Математическое моделирование сложных аэроупругих систем [Текст] / В. И. Морозов. – М.: Физ.-мат. лит. 1995. – 709 с.
3. Динамическая реакция очень лёгкого самолёта на воздействие турбулентной атмосферы [Текст] / В.С. Лыпко, В.М. Онищенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац.аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2013. – №59. – С. 29-35.
4. Доброленский, Ю.П. Динамика полета в неспокойной атмосфере [Текст] / Ю.П. Доброленский. – М.: Машиностроение, 1969. – 256 с.

5. Тэйлор, Дж. Нагрузки, действующие на самолет [Текст] / Дж. Тейлор; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1971. - 372 с.
6. Жулев, В.И. Безопасность полетов летательных аппаратов [Текст] / В.И. Жулев, В.С. Иванов. – М.: Транспорт, 1986 г.
7. ОСТ 102514-84. Модель турбулентности атмосферы. – Введ. 01.01.1986. – 13 с.
8. Руководство по летной эксплуатации самолета Cessna-172 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tosnoaero.ru/library/manual/Cessna-172.pdf> .
9. Зубков, Б.В. Основы безопасности полетов [Текст] / Б.В. Зубков, Е.Р. Минаев – М.: Транспорт, 1987. – 143 с.
10. Платонов, К. К. Человек в полете [Текст] / К.К. Платонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1957. – 288 с.
11. Федоренко, Г. И. Синтез активной системы повышения комфорта экипажа и пассажиров на тяжелых самолетах [Текст] / Г. И. Федоренко, В. И. Жулев, В. Ф. Бородин – М.: ВИНТИ, 1982. – 114 с.

Поступила в редакцию 06.03.2017

Алгоритм і програмне забезпечення для оцінювання рівня безпеки польоту літака в турбулентній атмосфері на етапі попереднього проектування

Проведено аналіз впливу атмосферної турбулентності на безпеку польоту літака. Запропоновано теоретичну методику і алгоритм для оцінювання впливу турбулентності на безпеку польоту літака. Запропоновано варіант програмного забезпечення для оцінювання рівня безпеки польотів літака в турбулентній атмосфері на етапі попереднього проектування.

Ключові слова: безпека польотів, атмосферна турбулентність, алгоритм, програмне забезпечення, попереднє проектування.

Algorithm and Software for Predicting Flight Safety of the Aircraft in the Atmospheric Turbulence at the Preliminary Design Stage

The analysis of the influence of atmospheric turbulence on flight safety of the aircraft performed. The theoretical method and algorithm for assessing the impact of turbulence on flight safety of the aircraft are proposed. A version of the software to assess safety of the aircraft in turbulent atmosphere at the stage of preliminary design is proposed.

Keywords: flight safety, atmospheric turbulence, algorithm, software, preliminary design.

Сведения об авторах:

Кибальний Михаил Юрьевич – студент группы 150 М ОПС, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Сердюков Александр Анатольевич – ст. преподаватель .каф. 103 «Проектирования самолетов и вертолетов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.