

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.735

doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73

Влияние вихревого спутного следа на взаимную безопасность крылатых летательных аппаратов, следующих по одному маршруту

Р.Н. Филиппов, Е.А. Титова

АО «ОКБ «Новатор»

Effect of the Wake Vortex on the Mutual Safety of Winged Aircraft Following the Same Route

R.N. Filippov, E.A. Titova

JSC OKB Novator

Спутный вихревой след состоит главным образом из двух вихрей, образующихся при обтекании потоком крыльев летательного аппарата (ЛА). Предложена и исследована полуэмпирическая модель устойчивого вихревого следа, позволяющая описать поле скоростей в вихре, в зависимости от характеристик ЛА, являющегося генератором вихревого спутного следа, а также оценить влияние вихря на последующий ЛА. Проведено статистическое моделирование с целью определения безопасного интервала между двумя ЛА для характерных участков траектории. При движении над морем выбраны прямолинейный маршрут, траектория с поворотами и подъем на высоту для облета острова. На сухопутном участке движения смоделирован полет над рельефом. Показано значительное влияние пересеченности рельефа на вероятность падения ЛА при попадании в вихревой спутный след. Исследовано влияние смещения траекторий ЛА в вертикальной и горизонтальной плоскостях и увеличения средней скорости полета на безопасный интервал между ЛА.

Ключевые слова: вихревой след, атмосферная турбулентность, летательный аппарат, моделирование полета, взаимная безопасность

The wake vortex consists mainly of two vortices, which are formed when the stream flows around the wings of an aircraft. A semi-empirical model of a stable vortex wake is proposed and analyzed. The model allows describing the velocity field in a vortex, depending on the characteristics of the aircraft generator, as well as assessing the effect of the vortex on the subsequent aircraft. Statistical modeling was carried out to determine the safe interval between the aircrafts for the characteristic sections of the trajectory. When moving over the sea, a straight-line route, a trajectory with turns and an ascent to an altitude for flying around the island were chosen; on the land section of the movement, a flight over the relief

was simulated. A significant influence of the ruggedness of the relief on the probability of an aircraft falling when it enters a wake vortex is shown. The effect of the displacement of the aircraft trajectories in the vertical and horizontal planes and the increase in the average flight speed on the safe interval between the aircrafts is investigated.

Keywords: wake vortex, atmospheric turbulence, aircraft, flight simulation, mutual safety

При попадании крылатого летательного аппарата (ЛА) в вихревой спутный след возникают значительные возмущения по крену, что может привести к потере управляемости и падению. Таким образом, моделирование характеристик вихревого следа и движения попавшего в него ЛА представляет большой практический интерес [1–3].

Смоделирован полет двух ЛА с одинаковой скоростью по одному маршруту. Первый ЛА является генератором вихревого спутного следа, второй ЛА подвергается воздействию вихря в процессе полета. Рассмотрена полуэмпирическая модель вихревого следа, позволяющая определить поле скоростей и положение вихрей с учетом характеристик порождающего вихревой след ЛА-генератора, а также модель эволюции спутного следа, учитывающая диффузию вихря, его опускание вниз под действием силы тяжести и боковое смещение под воздействием ветра. При моделировании полета второго ЛА учитывалось воздействие вихря в виде добавочной силы и момента.

Математическая модель вихревого следа за ЛА. Вихрь, образующийся при срыве потока с крыльев ЛА, зависит от массы, скорости, формы крыла ЛА и параметров окружающей атмосферы [4]. Фотография вихревого конденсаци-



Рис. 1. Фотография вихревого конденсационного следа, образующегося за самолетом

онного следа, образующегося за самолетом, приведена на рис. 1. В вихревом следе можно выделить три зоны: формирования, устойчивого существования и разрушения вихрей вследствие неустойчивости.

Анализ теоретических и экспериментальных данных показывает, что размер зоны устойчивого существования вихрей практически не зависит от числа Рейнольдса, а значит, и от условий атмосферной турбулентности [5]. Таким образом, размер зоны формирования вихрей определяется размахом крыла первого ЛА [1] и составляет $(5...10) L_{кр}$, где $L_{кр}$ — размах крыла.

После разрушения вихревого следа остаточные возмущения не представляют угрозы полету, поэтому смоделирована только зона устойчивого существования вихря.

Время существования упорядоченных вихрей до разрушения [2] определяется выражением

$$t^* = \frac{2\pi t_0^* b_B^2}{\Gamma_0}. \quad (1)$$

Здесь t_0^* — эмпирическая величина, связанная с характеристиками турбулентности и зависящая от средней скорости ветра, $t_0^* = 2...6$; b_B — расстояние между осями вихрей, $b_B = \pi L_{кр}/4$; Γ_0 — начальная циркуляция обеих вихрей, которую для крейсерского режима полета со скоростью v можно найти из теоремы Жуковского [6],

$$\Gamma_0 = \frac{mg}{\rho v},$$

где mg — вес ЛА; ρ — плотность атмосферного воздуха.

Тангенциальную компоненту скорости вихря можно описать в виде решения Ламба с эмпирическими коэффициентами [7–9]:

• при $r \leq r_c$

$$v_r(r) = 1,4 \frac{\Gamma}{2\pi r} \left\{ 1 - \exp \left[-10 \left(\frac{r_c}{L_{кр}} \right)^{3/4} \right] \right\} \times \left\{ 1 - \exp \left[-1,2526 \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right] \right\};$$

- при $r > r_c$

$$v_\tau(r) = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left\{ 1 - \exp \left[-10 \left(\frac{r_c}{L_{кр}} \right)^{3/4} \right] \right\}.$$

Здесь r — расстояние до центра вихря; r_c — радиус ядра вихря; Γ — циркуляция в момент времени t ,

$$\Gamma = \Gamma_0 (1 - k_\Gamma t),$$

где k_Γ — коэффициент, распределенный по нормальному закону и введенный для учета диффузии вихря, $k_\Gamma = 0,01 \dots 0,02$

Из экспериментов, проведенных в работе [10], известно, что при малых углах атаки (в пределах 6°), соответствующих крейсерскому режиму полета ЛА, циркуляция вихря остается постоянной. Радиус ядра вихря определяется следующей эмпирической зависимостью [11, 12]:

$$r_c = 0,041 \frac{S_{кр}}{L_{кр}} \sqrt{1 + 0,038 \Gamma_0 \left(\frac{L_{кр}}{S_{кр}} \right)^2 t}, \quad (2)$$

где $S_{кр}$ — площадь крыла с подфюзеляжной частью.

Рассчитанная указанным методом зависимость тангенциальной компоненты скорости вихря и вызванным попаданием в вихревой след приращением угла атаки от расстояния до центра вихря r при весе ЛА $mg = 10\,300,5$ Н, плотности атмосферного воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³ и скорости полета $v = 220$ м/с приведена на рис. 2. Видно, что максимальные значения тангенциальной скорости и приращения угла атаки достигаются на расстоянии, равном радиусу ядра вихря.

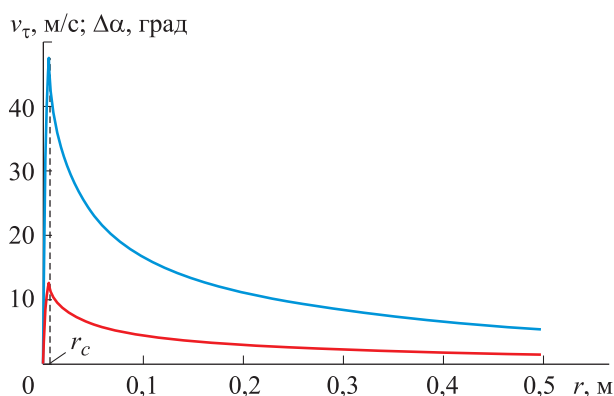


Рис. 2. Зависимость тангенциальной компоненты скорости вихря v_τ (—) и приращения угла атаки $\Delta\alpha$ заднего ЛА (—) от расстояния до центра вихря r при весе ЛА $mg = 10\,300,5$ Н, плотности атмосферного воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³ и скорости полета $v = 220$ м/с

Два вихревых жгута в области устойчивого вихревого следа опускаются вниз со скоростью

$$v_y = k_v \frac{\Gamma(t)}{2\pi b_b}, \quad (3)$$

где k_v — случайное число, распределенное по нормальному закону, $k_v = 0,15 \dots 0,80$.

Моделирование проведено для ЛА с размахом крыла 2,5 м и площадью крыла с подфюзеляжной частью $S_{кр} = 1,04$ м².

Моделирование воздействия вихревого следа на ЛА. Зона спутного следа смоделирована двумя вихревыми жгутами с противоположным направлением вращения и одинаковой интенсивностью [13]. Для определения аэродинамических сил и моментов, действующих на ЛА, попавший в вихревой след, использован расчетный метод, включающий в себя следующие этапы:

- расчет циркуляции вихря, радиуса его ядра и поля скоростей, индуцируемого вихрем, по текущей массе и скорости первого ЛА с учетом заданного временного интервала между ЛА;
- определение ортодромических координат спутных вихрей, сошедших с левого и правого крыльев первого ЛА, по текущим ортодромическим координатам ЛА с учетом их опускания и сноса воздушным потоком [14];
- построение распределения приращения местного угла атаки $d\alpha(z)$ вдоль размаха крыла заднего ЛА для каждого из двух спутных вихрей;
- нахождение приращения нормальной силы вдоль консолей крыла и дополнительного момента крена с использованием полученного приращения местного угла атаки и графика нормальной силы двух консолей крыла, из которого определяется эта сила для одной консоли по углу атаки;
- вычисление суммарного возмущающего момента и добавочной подъемной силы.

На спутный вихревой след влияет атмосферная турбулентность (колебания плотности и температуры воздуха), поэтому случайные факторы, участвующие в расчете параметров спутного следа, оценивались статистически. Так как атмосферные параметры (температура воздуха, давление, плотность и скорость ветра) находятся в явной зависимости от географического положения ЛА, сезона и времени суток, эти факторы выбирались для заданного района и случайного дня из архива погоды.

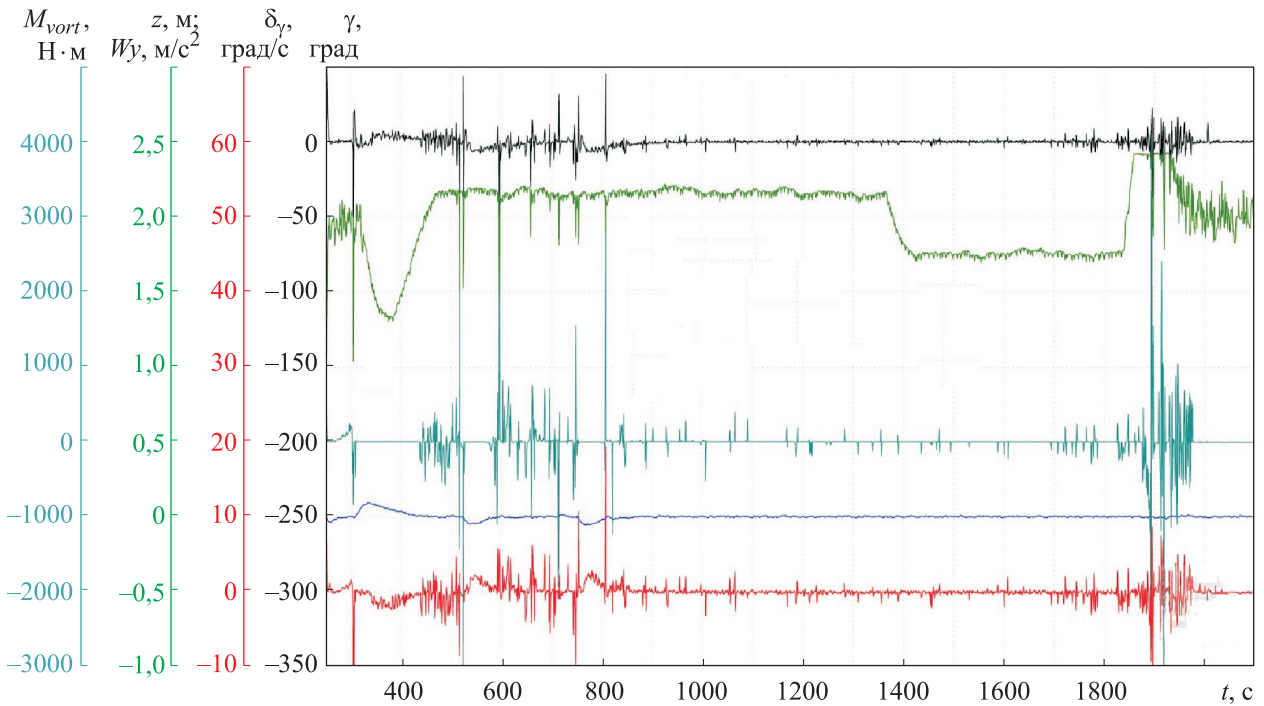


Рис. 3. Зависимости параметров полета ЛА, попавшего в вихревой след при движении над островом, от времени полета t :

— угла крена γ ; — расхода рулей в канале крена δ_γ ; — располагаемой перегрузки W_y ;
 — отклонения от ортодромии в горизонтальной плоскости z ;
 — момента, созданного вихрем M_{vort}

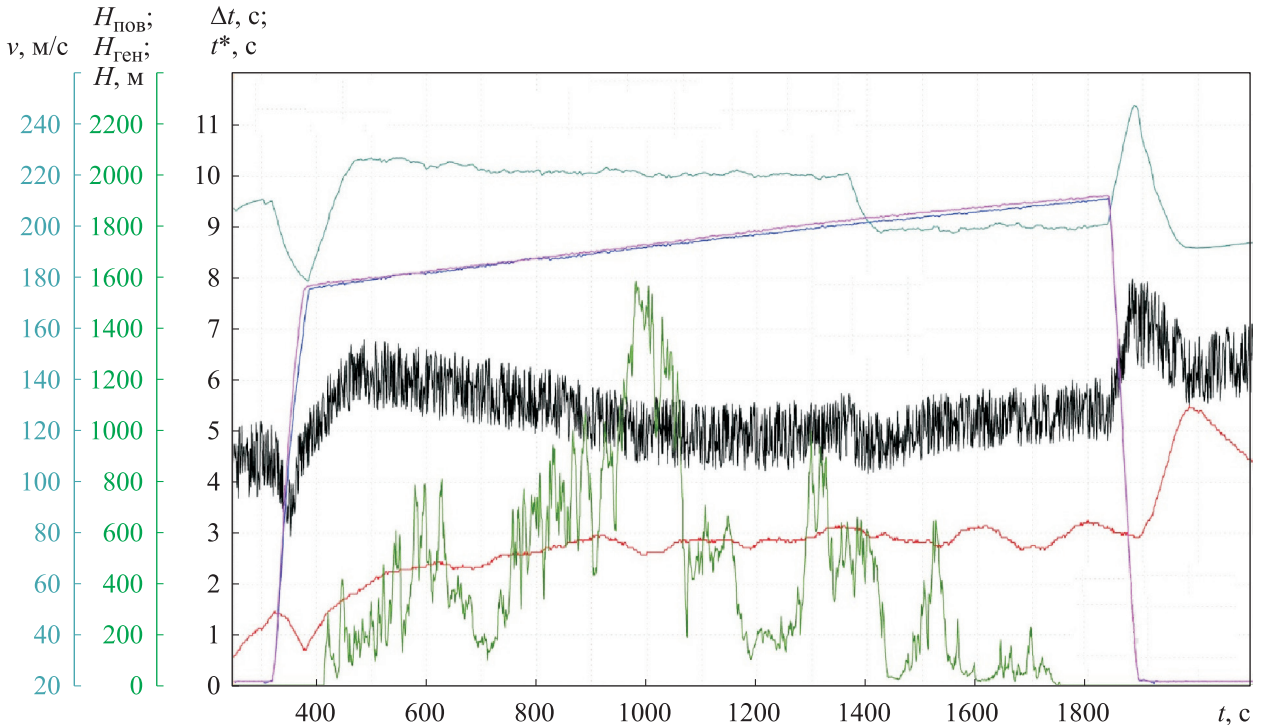


Рис. 4. Зависимости параметров полета ЛА, попавшего в вихревой след при движении над островом, от времени полета t :

— времени жизни вихревого следа t^* ; — временного интервала между ЛА Δt ;
 — высоты земной поверхности $H_{пов}$; — высоты полета ЛА H ;
 — скорости полета ЛА v ; — высоты полета ЛА-генератора $H_{ген}$

При полете двух ЛА по одному маршруту с временным интервалом $\Delta t \leq 10$ с атмосферные параметры не успевают измениться, поэтому они приняты одинаковыми для обоих ЛА. Конструктивные разбросы полагались независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному закону, и формировались независимо для каждого ЛА.

На рис. 3 и 4 показаны расчетные зависимости параметров полета ЛА, попавшего в вихревой след при облете острова. Видно, что попадание в вихревой след приводит к появлению дополнительного вихревого момента, который отклоняет ЛА по углу крена γ .

Статистическое моделирование движения ЛА выполнено для трех начальных временных интервалов ($\Delta t = 1, 3$ и 5 с) между двумя ЛА. Предполагалось, что первый и второй ЛА выдерживают одинаковую скоростную программу, поэтому временной интервал однозначно задает и расстояние между двумя ЛА.

Результаты статистического моделирования.

Для определения динамики ЛА в вихревом спутном следе проведено статистическое моделирование 500 реализаций полета двух однотипных ЛА для различных маршрутов, чтобы учесть влияние характера подстилающей поверхности.

Маршруты над сушей пронумерованы по возрастанию пересеченности рельефа. Результаты статистической оценки взаимной безопасности ЛА от временного интервала между ЛА Δt приведены на рис. 5 и 6. При моделировании полета над островом рассмотрена только одна скорость, так как при затяжном подъеме ЛА не выдерживают увеличенной до 240 м/с скорости.

Из формулы (1) следует, что для полета со скоростью 190 м/с время жизни вихревого следа не превосходит 7 с, для скорости 240 м/с — 9 с. Как видно из рис. 5 и 6, для заданной вероятности безопасности полета ЛА интервал движения может быть меньше, чем время жизни вихревого следа.

По формулам (1), (2) можно оценить размеры вихревого следа. Если пренебречь смещением вихря по вертикали, то спутный вихрь можно приближенно описать цилиндром [15] радиусом $c_0 = L_{кр}$ и длиной $a_0 = vt^*$, где t^* — время жизни вихревого следа. При наличии вертикальной скорости опускания вихрей изменится только длина цилиндра $a_y = vt_1$, где t_1 — вре-

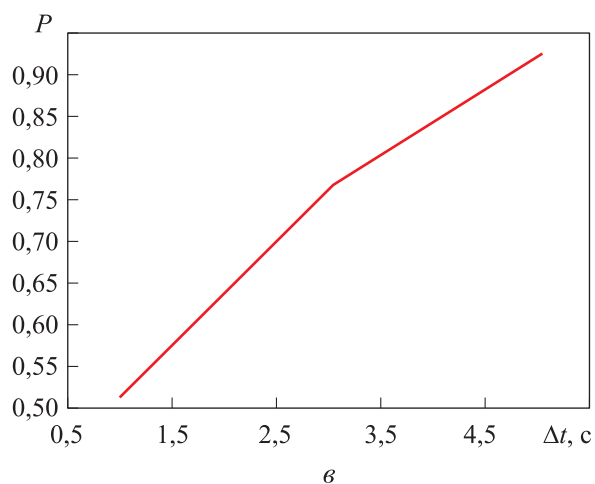
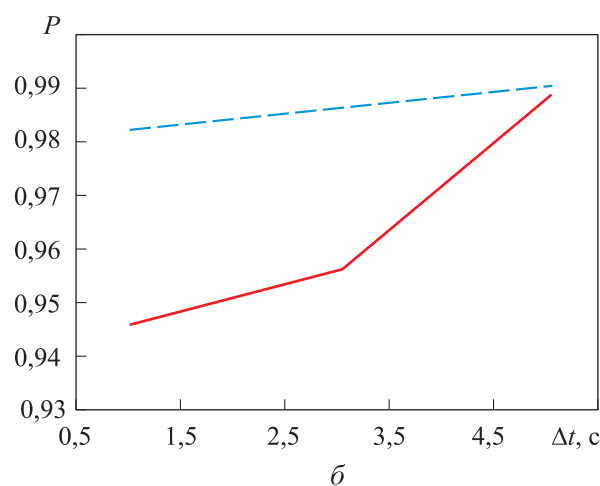
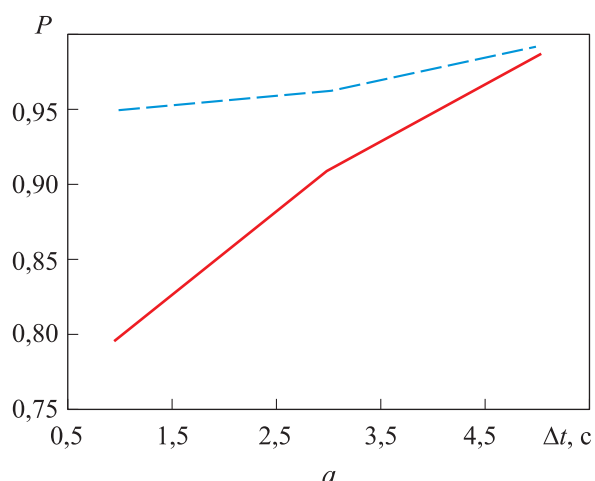


Рис. 5. Зависимости вероятности безопасности полета ЛА со скоростью 220 (—) и 240 м/с (---) от временного интервала Δt при попадании ЛА в вихревой след на морском участке траектории для различных маршрутов: а и б — с поворотами и без них; в — с облетом острова

мя, за которое центр вихря со скоростью v_y опустится на высоту, равную $L_{кр}$.

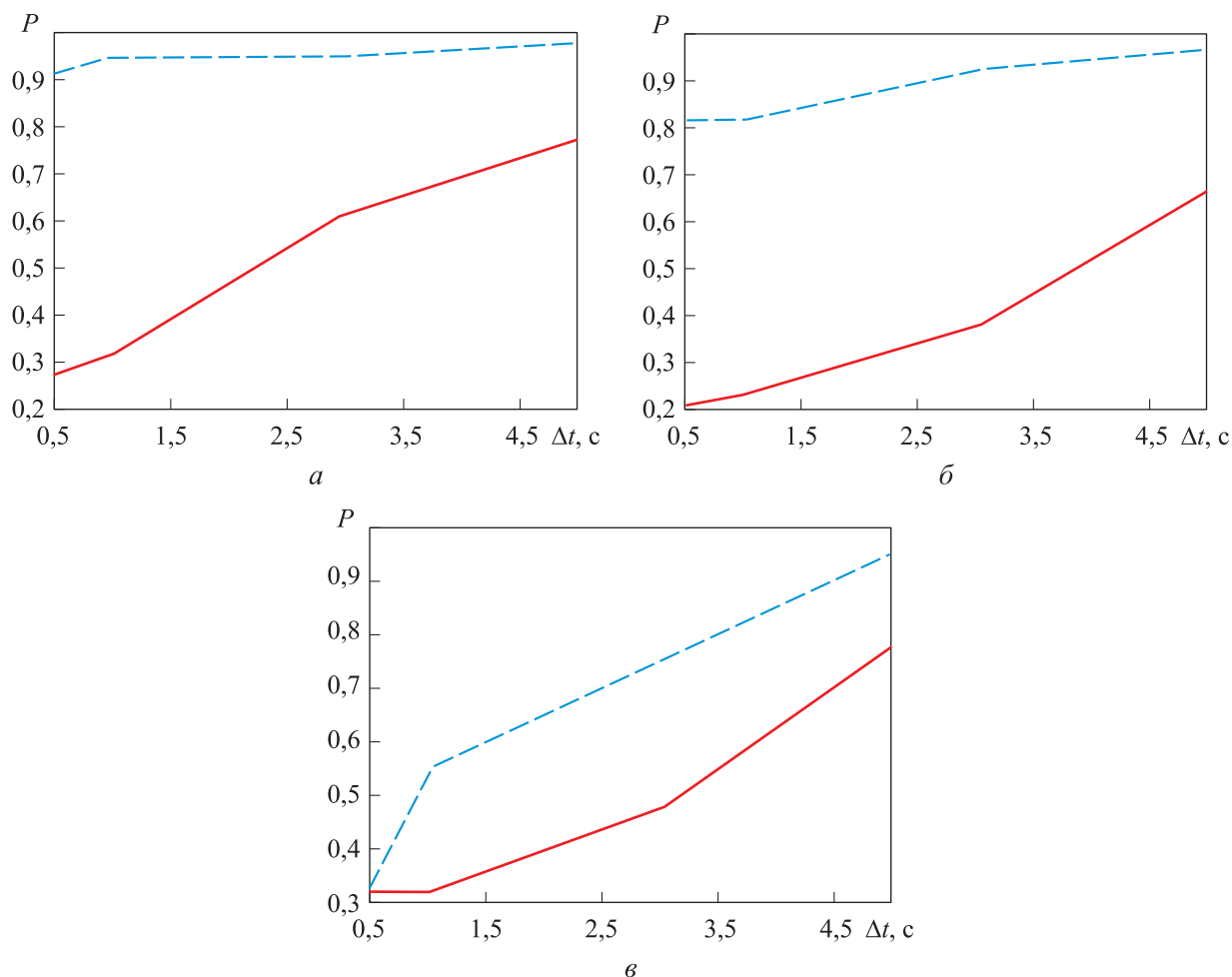


Рис. 6. Зависимости вероятности безопасности полета ЛА P со скоростью 190 (—) и 240 м/с (---) от временного интервала Δt при попадании ЛА в вихревой след на сухопутном участке траектории для маршрутов № 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Таблица 1

Значения вероятности безопасности полета ЛА на морском участке траектории при попадании в вихревой спутный след с временным интервалом $\Delta t = 3$ с

Тип маршрута	v , м/с	ΔZ , м	ΔH , м	Количество падений	Вероятность безопасности
С поворотами	220	5	0	25	0,950
	220	0	5	3	0,994
	240	5	0	14	0,972
	240	0	5	0	1,000
Прямолинейный	220	5	0	4	0,992
	220	0	5	3	0,994
	240	5	0	7	0,986
	240	0	5	5	0,990
Облет острова	—	5	0	94	0,812
	—	0	5	53	0,894
	—	10	0	52	0,896
	—	0	10	15	0,970

Таблица 2

Значения вероятности безопасности полета ЛА на сухопутном участке траектории при попадании в вихревой спутный след с временным интервалом $\Delta t = 3$ с

Номер маршрута	ΔZ , м	ΔH , м	Количество падений	Вероятность безопасности
1	10	0	42	0,916
	0	10	35	0,926
2	10	0	46	0,742
	0	10	54	0,720
3	10	0	129	0,558
	0	10	139	0,520

Разведение траекторий в горизонтальной и вертикальной плоскостях должно уменьшать необходимый для безопасности полета интервал между ЛА. В табл. 1 и 2 приведены значения статистически определенной вероятности безопасности полета ЛА со смещением траекторий в горизонтальной ΔZ и вертикальной ΔH плоскостях при попадании в вихревой след с временным интервалом $\Delta t = 3$ с.

Выводы

1. Применение быстрой прогностической модели позволяет рассчитывать в реальном времени параметры вихревого следа и его воздействие на задний ЛА. Разработанная модель дает возможность оценивать взаимную безопасность двух ЛА, летящих по одному маршруту, и выбирать безопасный временной интер-

вал движения, который может быть меньше времени жизни вихревого следа.

2. Для повышения вероятности взаимной безопасности целесообразно задавать смещение траекторий первого и второго ЛА по высоте или в горизонтальной плоскости.

3. Предложенная модель позволяет вычислить безопасный интервал смещения в зависимости от выбранного временного интервала и заданной скорости полета. Выбор безопасных интервалов между ЛА дает возможность определить наиболее плотный порядок движения. Повышение скорости ЛА-генератора приводит к уменьшению циркуляции и увеличению времени жизни устойчивого следа.

4. Созданная модель позволяет выбрать оптимальную скорость полета с учетом воздействия вихревого спутного следа на задний ЛА.

Литература

- [1] Кобрин В.Н., Соловьев О.В., Чмовж В.В. Анализ процесса формирования вихревых следов за летательными аппаратами. *Системы озброєння і військова техніка*, 2013, № 2, с. 93–98.
- [2] Вышинский В.В., Стасенко А.Л. Физические модели, численные и экспериментальные исследования аспектов авиационной экологии и безопасности полетов. *Труды МФТИ*, 2009, т. 1, № 3, с. 23–39.
- [3] Желанников А.И. К исследованию характеристик вихревого следа за самолетом A380 на режимах взлета и посадки. *Научный Вестник МГТУ ГА*, 2016, т. 19, № 6, с. 51–57.
- [4] Ahmadi-Baloutaki M., Carriveau R., Ting D.S.-K. An experimental study on the interaction between free-stream turbulence and a wing-tip vortex in the near-field. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2015, vol. 43, pp. 395–405, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.03.021>
- [5] Булат П.В., Минин О.П. О современном подходе к проектированию беспилотных летательных аппаратов самолетного типа с коротким взлетом и посадкой. Часть III. Численное моделирование вихревой аэродинамики летательного аппарата методом дискретных вихрей. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2018, т. 18, № 2, с. 169–190, doi: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-2-169-190>
- [6] Anderson J.D. *Fundamentals of aerodynamics*. Boston, McGraw-Hill, 2001. 892 p.

- [7] Shen S., Ding F., Han J., et al. Numerical modeling studies of wake vortices: real case simulation. *AIAA Paper*, 1999, no. 0755, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1999-755>
- [8] Jugier R., Fontane J., Joly L., et al. Linear two-dimensional stability of a Lamb-Oseen dipole as an aircraft wake model. *Phys. Rev. Fluids*, 2020, vol. 5, no. 1, art. 014701, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.014701>
- [9] Кузнецов В.Л., Хаустов А.А. Моделирование динамики воздушного судна в спутном следе. *Научный Вестник МГТУ ГА*, 2013, № 195, с. 5–12.
- [10] Степанов Р.П., Кусюмов А.Н., Михайлов С.А. и др. Экспериментальное исследование концевых вихрей за крылом конечного размаха. *Труды МАИ*, 2019, № 107. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=107894>
- [11] McCormick B.W. Wake turbulence: its creation, decay and threat to aircraft. *Aircraft Flight Safety Int. Conf. Proc.*, 1993, pp. 106–113.
- [12] Хаустов А.А. Динамика крена воздушного судна в спутном следе. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2009, № 150, с. 11–18.
- [13] Головнев И.Г., Вышинский В.В., Желанников А.И. и др. Принципы построения бортовой системы раннего предупреждения пилота о вхождении в вихревой след от другого воздушного судна. *Научный Вестник МГТУ ГА*, 2018, т. 21, № 4, с. 84–95, doi: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-4-84-95>
- [14] Миллер А.Б., Стасенко А.Л. Динамическая модель спутных вихрей самолета у Земли при порывистом градиентном ветре. *Ученые записки ЦАГИ*, 2005, т. 36, № 3-4, с. 3–12.
- [15] Удовенко В.А., Гладышев А.И. Моделирование на пилотажном стенде полета легкого вертолета в спутном следе другого вертолета. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*, 2019, № 22, с. 108–116.

References

- [1] Kobrin V.N., Solov'yev O.V., Chmovzh V.V. Analysis of forming wake vortex process behind aircraft. *Sistemi ozbroennya i viys'kova tekhnika* [Systems of Arms and Military Equipment], 2013, no. 2, pp. 93–98 (in Russ.).
- [2] Vyshinskiy V.V., Stasenko A.L. Physical models, numerical and experimental studies on aspects of aviation ecology and flight safety. *Trudy MFTI* [Proceedings of MIPT], 2009, vol. 1, no. 3, pp. 23–39 (in Russ.).
- [3] Zhelannikov A.I. K To the study of wake vortex behind the airbus-380 characteristics at take-off and landing. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2016, vol. 19, no. 6, pp. 51–57 (in Russ.).
- [4] Ahmadi-Baloutaki M., Carriveau R., Ting D.S.-K. An experimental study on the interaction between free-stream turbulence and a wing-tip vortex in the near-field. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2015, vol. 43, pp. 395–405, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.03.021>
- [5] Bulat P.V., Minin O.P. On modern approach to airplane-type unmanned aerial vehicles design with short takeoff and landing. Part III. Numerical modeling of aircraft vortex aerodynamics by discrete vortex method. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2018, vol. 18, no. 2, pp. 169–190, doi: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-2-169-190> (in Russ.).
- [6] Anderson J.D. *Fundamentals of aerodynamics*. Boston, McGraw-Hill, 2001. 892 p.
- [7] Shen S., Ding F., Han J., et al. Numerical modeling studies of wake vortices: real case simulation. *AIAA Paper*, 1999, no. 0755, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1999-755>
- [8] Jugier R., Fontane J., Joly L., et al. Linear two-dimensional stability of a Lamb-Oseen dipole as an aircraft wake model. *Phys. Rev. Fluids*, 2020, vol. 5, no. 1, art. 014701, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.014701>
- [9] Kuznetsov V.L., Khaustov A.A. The self-consistent problem of aircraft dynamics in wake vortex. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2013, no. 195, pp. 5–12 (in Russ.).

- [10] Stepanov R.P., Kusyumov A.N., Mikhaylov S.A., et al. Experimental study of wingtip vortices behind the finite-span wing. *Trudy MAI*, 2019, no. 107. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=107894> (in Russ.).
- [11] McCormick B.W. Wake turbulence: its creation, decay and threat to aircraft. *Aircraft Flight Safety Int. Conf. Proc.*, 1993, pp. 106–113.
- [12] Khaustov A.A. Aircraft roll dynamics in the wake vortex. *Nauchnyy vestnik MGTU GA [Civil Aviation High Technologies]*, 2009, no. 150, pp. 11–18 (in Russ.).
- [13] Golovnev I.G., Vyshinskiy V.V., Zhelannikov A.I., et al. Design concepts of an onboard early warning system of pilot about entering wake vortices from another aircraft. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA [Civil Aviation High Technologies]*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 84–95. doi: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-4-84-9> (in Russ.).
- [14] Miller A.B., Stasenko A.L. Dynamic model of aircraft wake vortex near the ground at rough gradient wind. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2005, vol. 36, no. 3-4, pp. 3–12 (in Russ.).
- [15] Udovenko V.A., Gladyshev A.I. Piloted simulation of the flight of the light helicopter in the wake of another helicopter. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Seriya: Matematichne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Mathematical modeling in engineering and technologies]*, 2019, no. 22, pp. 108–116 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 24.06.2021

Информация об авторах

ФИЛИППОВ Роман Николаевич — начальник бюро отдела 31. АО «ОКБ «Новатор» (620017, Екатеринбург, Российская Федерация, проспект Космонавтов, д. 18, e-mail: romataurus@yandex.ru).

ТИТОВА Екатерина Александровна — кандидат физико-математических наук, инженер-конструктор второй категории отдела 31. АО «ОКБ «Новатор» (620017, Екатеринбург, Российская Федерация, проспект Космонавтов, д. 18, e-mail: ekatitova@mail.ru).

Information about the authors

FILIPPOV Roman Nikolaevich — Head of the Bureau, Department No. 31. JSC OKB Novator (620017, Ekaterinburg, Russian Federation, Kosmonavt Ave., Bldg. 18, e-mail: romataurus@yandex.ru).

TITOVA Ekaterina Aleksandrovna — Candidate of Science (Phys. and Math.), Design Engineer. Department No. 31. JSC OKB Novator (620017, Ekaterinburg, Russian Federation, Kosmonavt Ave., Bldg. 18, e-mail: ekatitova@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Филиппов Р.Н., Титова Е.А. Влияние вихревого спутного следа на взаимную безопасность крылатых летательных аппаратов, следующих по одному маршруту. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10, с. 65–73, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73

Please cite this article in English as:

Filippov R.N., Titova E.A. Effect of the Wake Vortex on the Mutual Safety of Winged Aircraft Following the Same Route. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 65–73, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73