

УДК 629.7.015.7

О.В. Соловьев<sup>1</sup>, П.В. Прусак<sup>2</sup>, Н.В. Кобрина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГП «Чугуевский авиационный ремонтный завод», Чугуев, Украина,

<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИХРЕВЫХ СЛЕДОВ

Кратко рассматривается возможность разработки единого подхода в оценке степени вихревой безопасности для воздушного судна в районе крупного аэроузла. Показана актуальность исследований спутных и вихревых следов в районе аэродрома. Проведён анализ существующих методов исследования характеристик спутных и вихревых следов. Показаны направления в разработке системы вихревой обстановки в районе аэропорта.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, спутный след, метод дискретных вихрей.

### Введение: мероприятия ИКАО по обеспечению безопасности полётов

Обеспечение заданного уровня безопасности полётов в районе аэродрома с учётом вихревых следов определяется предупреждением входа летательного аппарата (ЛА) в зону их воздействия. Анализ исследований [1] определяет основные направления решения проблемы вихревой безопасности в районе аэродрома:

- установка безопасных временных и пространственных интервалов между ЛА, например [2], (рис. 1, 2);

- разработка способов разрушения концевых вихрей бортовыми или наземными средствами;

- разработка и создание технических систем обнаружения вихревых следов;

- разработка и создание систем прогноза вихревой обстановки в районе аэродрома.

Самолёт-генератор	Самолёт, вошедший в след			
	Super	Heavy	Medium	Light
Super	4,0	6,0	7,0	8,0
Heavy	2,5	4,0	5,0	6,0
Medium	2,5	2,5	2,5	5,0
Light	2,5	2,5	2,5	2,5

Рис. 1. Нормативы горизонтального эшелонирования по ИКАО, морские мили [2]

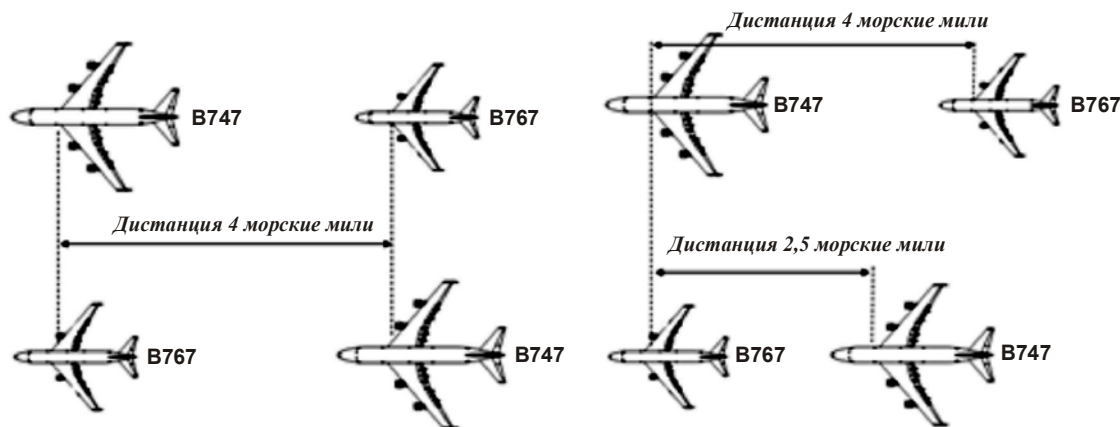


Рис. 2. Безопасные интервалы между летательными аппаратами [3]

За рубежом большие надежды возлагались на стационарные и бортовые системы инструментального обнаружения вихревых следов. Однако многолетние разработки в этой области показали бесперспективность использования для этих целей бортовых лидаров и РЛС. Принципы построения и архитектура разрабатываемых национальных систем вихревой безопасности соответствуют тому, что изложено в рабочем документе А36-WP/193 "Актуальность проблемы вихревой безопасности в граж-

данской авиации", представленному на 36-й Ассамблее ИКАО [1]. Подобие архитектуры и технических решений потенциально позволяет построить единую систему вихревой безопасности в рамках глобальной аэронавигационной системы.

Одним из путей повышения пропускной способности ВПП является пересмотр минимумов эшелонирования воздушных судов, введенных ИКАО в начале 70-х годов XX века. По мнению многих специалистов, интервалы ИКАО по эшелонированию

воздушных судов по турбулентности вихревого следа не в полной мере соответствует современным требованиям. Введенные ИКАО три категории самолетов (тяжелый, средний, лёгкий), характеризующие степень опасности вихревого следа ЛА, достаточно приблизительно отражают современный мировой парк воздушных судов (ВС), не учитывая ввод в эксплуатацию новых супертяжелых самолётов, влияние которых с точки зрения вихревого следа, как представляется, не до конца изучено и таит в себе ряд потенциальных проблем.

Предварительные исследования показывают, что интервалы эшелонирования, например в категории "средний", излишне консервативны и могут быть значительно сокращены без ущерба для безопасности полетов. Для этого необходимо провести процесс "рекатегоризации", т.е. детального пересмотра существующих категорий самолётов с увеличением количества вихревых категорий самолётов в целях придания системам обеспечения взлёта и посадки операционной гибкости.

Применение в аэропортах надежных всепогодных систем предупреждения о вихревых следах позволит в ближайшем будущем с учётом роста объёмов перевозок перейти к динамически изменяемым интервалам эшелонирования, зависящим от конкретных пар самолётов и существующих метеорологических условий (рис. 3).

Самолёт-генератор вихревого следа	Самолёт, вошедший в вихревой след					
		A	B	C	D	E
A	2,5	6,0	6,0	7,0	7,0	8,0
B	2,5	3,0	4,0	5,0	5,0	7,0
C	2,5	2,5	2,5	3,5	3,5	6,0
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	5,0
E	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4,0
F	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Рис. 3. Нормативы интервалов для новых категорий самолётов, морские мили [2]

Проведение работ в области вихревой рекатегоризации воздушных судов требует разработки под эгидой ИКАО единой методологии проведения процедуры рекатегоризации (рис. 4).

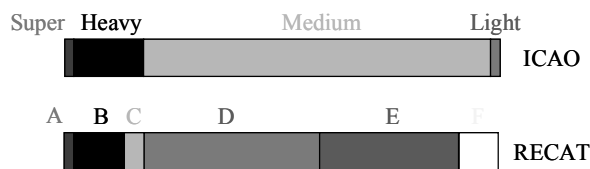


Рис. 4. Рекатегоризация типов самолётов согласно SESAR [2]

Основные её принципы могут быть сведены к следующему:

а) использование интенсивности вихревого следа в качестве меры опасности, а не максимального взлётно-го веса самолёта;

б) недопущение входа воздушных судов в более интенсивные следы, чем те, которые существуют в настоящее время;

в) использование наведённого угла крена в качестве меры опасности попадания самолёта в вихревой след.

Расчёт процесса затухания циркуляции вихревого следа должен будет проводиться по моделям, протестированным в рамках совместных исследований США, стран Европы и Российской Федерации.

Многие практические приложения системы вихревой безопасности полётов должны базироваться на системе исходных данных, необходимых для расчёта вихревых следов за воздушными судами, а также определения устойчивости и управляемости воздушных судов в турбулентности вихревого следа и определения безопасных интервалов следования. К таким приложениям относятся программные комплексы для проведения процедуры вихревой рекатегоризации, бортовые системы предупреждения входа в вихревые следы, наземные системы мониторинга и прогноза вихревой обстановки в районе аэродрома и районных центров управления воздушным движением (УВД), а также специализированные авиационные тренажеры. Полагается целесообразным, что такая система исходных данных должна содержаться в базе данных ИКАО по вихревой турбулентности самолётов, аналогично созданным базам данных ИКАО по шумам и эмиссии.

Для обеспечения единства методического подхода в оценке степени вихревой безопасности воздушного судна полагается целесообразным разработать процедуру его сертификации по степени опасности его вихревого следа (аналогично сертификации самолетов по шумам и эмиссии).

## Основная часть

### Методы исследования вихревого следа

Решение практических задач обеспечения безопасности полётов в условиях воздействия вихревого следа осуществляется теоретическими и экспериментальными методами, результаты которых взаимно дополняют и уточняют получаемые данные. Сложные процессы формирования и развития вихревого следа с учётом многих эксплуатационных факторов вызывают необходимость создания теоретических моделей, в которых широко используются эмпирические соотношения. Наибольший интерес представляют результаты, полученные в лётных экспериментах на самолётах с большими полётными весами [4, 5].

### Лётный эксперимент

В лётных экспериментах исследования вихревого следа проводятся с использованием [6]:

- самолёта-зондировщика, выполняющего полёт в вихревом следе;
- специально оборудованных наземных мачт;
- наземных акустических и лазерных систем.

В лётных экспериментах применяется дымовая визуализация концевых вихрей [6, 7]. Такой способ визуализации даёт возможность делать видимыми концевые вихри на больших расстояниях за самолётом-генератором и наблюдать характерные особенности течения в концевых вихрях и их разрушение. Самолёт-зондировщик, оборудованный измерительной аппаратурой, следует за самолётом-генератором и заданным образом пересекает вихревой след (рис. 5) [8 – 10]. Такой метод позволяет исследовать поле окружных скоростей и оценить интенсивность возмущений вихревого следа по значению угловых скоростей кренения, перегрузок и углов отклонения рулевых поверхностей самолёта-зондировщика, потребных для парирования воздействий вихревого следа.

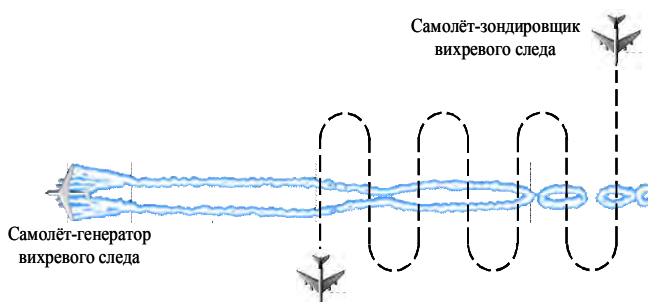


Рис. 5. Исследования характеристик вихревого следа с помощью самолёта-зондировщика

Менее распространённым способом проведения лётного эксперимента является способ, в котором самолёт-генератор является одновременно и зондировщиком [11], что позволяет делать замеры параметров вихревого следа на малых расстояниях от задней кромки крыла а следовательно, исследовать процессы формирования вихревого следа. К недостаткам такого способа исследований следует отнести неизбежные отклонения положения штанги с датчиками от заданного, а также ограничения, накладываемые при выполнении полёта, по скорости, высоте и длине буксировочного троса.

Начиная с 70-х годов XX в. в США и Канаде проводятся исследования вихревого следа с использованием специально оборудованных мачт [5 – 7]. В России большой объём таких исследований проведён в ЛИИ им. Громова [13 – 15].

При проведении таких экспериментов ставились следующие основные задачи:

- получить информацию о пространственной структуре течения в вихревом следе самолёта на малых высотах;

- оценить влияние на развитие и разрушение вихревого следа, состояние приземного слоя атмосферы и параметров полёта самолёта-генератора;

- дать рекомендации по повышению безопасности полётов.

Для определения скорости в исследуемом сечении вихревого следа используются термоанемометры, которые устанавливаются на мачте. Поля скоростей восстанавливались по результатам непрерывной регистрации и обработки показаний термоанемометров. Использование стационарных вышек (рис. 6) позволяет исследовать особенности развития и разрушения концевых вихрей на малой высоте, что представляет наибольший интерес для практических задач.



Рис. 6. Исследования характеристик вихревого следа с помощью стационарных вышек

Один из наиболее перспективных методов исследования вихревого следа - метод зондирования с помощью акустических и лазерных систем, принцип действия которых основан на эффекте Доплера [16, 17]. Такой способ исследования обладает очевидным преимуществом - чувствительные элементы не вносят возмущения в поток.

### Лабораторные исследования

Большой объём работ по исследованию вихревого следа выполнен с применением аэродинамических труб и гидрлотков [18, 19]. Существующий опыт лабораторных исследований свидетельствует о том, что стационарное оборудование лабораторий позволяет более детально и с меньшими затратами исследовать процессы формирования концевых вихрей и установить влияние на начальные параметры вихревого следа различных факторов (рис. 7):

- формы крыла в плане;
- угла атаки;
- механизации передней и задней кромки крыла;



Рис. 7. Исследования вихревого следа в аэродинамической трубе

Однако, экспериментальным исследованиям в аэродинамических трубах присущи следующие недостатки:

- возможность проявления масштабного эффекта и отсутствие надежной теории подобия вихревых течений;
- влияние датчика, размеры которого могут быть соизмеримы с размерами вихря, на достоверность полученных результатов;
- необходимость использования аэродинамических труб с подвижным экраном, перемещающимся со скоростью набегающего потока для исследования влияния "экрана" земли на поведение концевых вихрей.

### **Математическое моделирование вихревых следов**

Современный уровень развития ЭВМ и теоретических методов аэродинамики позволяет решать задачи по моделированию формирования, развития вихревого следа и его воздействие на ЛА, вошедшего в концевую вихрь [20].

Подходы к теоретическим исследованиям вихревого следа можно разделить на три группы :

- 1) приближенные инженерные методики;
- 2) аналитические методы;
- 3) вычислительные (численные) методы.

Инженерные методики [21] позволяют получать результаты на основе эмпирических данных, сведенных в графики, номограммы или полиграммы. Эти методики сравнительно просты и оперативны, не содержат сложных вычислений и позволяют получить результаты для сложных объектов, в том числе для ЛА в целом. Однако применение их ограничено кругом исследованных параметров и условий обтекания, а получаемая точность результатов, как правило, невысока.

Аналитические методы основаны на решении уравнений теоретической аэродинамики. Достоинством аналитических методов является строгость подхода и математическая достоверность получаемых результатов. Однако возможности этих методов ограничены, т.к. аналитическое решение задачи удается получать лишь для частных случаев и простейших объектов.[22, 23]

Численные методы, в ряде случаев, носят характер вычислительного эксперимента, в котором осуществляется математическое моделирование на ЭВМ процессов обтекания ЛА и его взаимодействия с потоком. Вычислительные методы обладают большими возможностями и являются весьма перспективными. С целью изучения вихревых следов используются различные методы теоретических исследований: прямое численное моделирование турбулентных течений (DNS) на базе решения уравнений Навье-Стокса, математическое моделирование крупных вихрей (LES), основанное на уравнениях Навье-

Стокса и подсеточной модели турбулентности, а также численное решение уравнений Рейнольдса (RANS), гидродинамически замкнутых дифференциальной моделью турбулентности [24, 25].

Наиболее информативными из перечисленных методов являются DNS и LES, позволяющие изучать характеристики спутного и вихревого следов с учётом плоскости раздела сред. Кроме того, они позволяют исследовать влияние турбулентности атмосферы, её стратификацию, сдвиг ветра, а также интерференцию струй газов, истекающих из сопел двигателей и вихревого следа. Методы математического моделирования RANS эффективны при решении модельных задач об интерференции вихрей с противоположным направлением их вращения вблизи поверхности раздела сред.

### **Разработка системы вихревой обстановки в районе аэропорта**

Авиационными специалистами ряда стран разработана база знаний о природе турбулентности вихревых следов, механизма их воздействия на воздушные суда, созданы методы математического моделирования вихревых следов, а также достоверные методы их измерения. В этом направлении проделана большая работа, однако вместе с тем ощущается потребность в надежных и эффективных инструментов практической реализации современных технологий обеспечения вихревой безопасности полётов. Эти вопросы находятся в центре внимания таких крупных национальных проектов в области построения систем УВД как NextGen (США), SESAR (Евросоюз) [1].

Решение практических задач обеспечения безопасности полётов в условиях воздействия вихревого следа осуществляется теоретическими и экспериментальными методами, результаты которых взаимно дополняют и уточняют полученные данные. Сложные процессы формирования и развития вихревого следа с учётом многих эксплуатационных факторов вызывают необходимость создания теоретических моделей, в которых широко используются эмпирические соотношения.

### **Выводы**

1. Показаны основные проблемы по обеспечению заданного уровня безопасности полётов, связанные с вихревыми следами.
2. В результате рассмотрения основных мероприятий, разработанных ИКАО, направленных на обеспечение безопасности полётов, проанализированы существующие системы вихревой обстановки в районе аэродрома и перспективные направления в их разработке.
3. Выполнен обзор и анализ существующих методов исследования характеристик вихревых следов.

## Список литературы

1. 37-я ассамблея ИКАО, A37-WP/268 [Text] / 2010.
2. ICAO Report "Wake Vortex aspects of the Airbus A-380 aircraft" [Text] / 11/10/2005: T 13/3-05-0661.SLG.
3. ИКАО, Cir 313, AT/134. Прогноз развития воздушного транспорта до 2025 года [Text] / МОГА, 2007. – 56 с.
4. Методы аэрофизических исследований в полёте [Text] / М. : Машиностроение, 1985. – 220с.
5. Garogz, L. J. The measurement of the Boeing-747 trailing vortex system using the tower fly-by technique FAA-RD-73-156 [Text] / L.J. Garogz, D.M. Lawrence, N.J. Miller / NAFEC, Atlantic City, June 1974.
6. Garogz, L.J. The measurement of the DC-7 trailing vortex system using the tower fly-by technique FAA-RD-73-141 [Text] / L.J. Garogz, D.M. Lawrence, N.J. Miller // NAFEC, Atlantic City, June 1973.
7. Page, R.D. Panel discussion on tower fly-by testing - 1990 fall series [Text] / R.D. Page, K.L. Clawson, L.J. Garods, R. P. Rudis // Proceeding of the aircraft wake vortices conference. Washington, D.C., October 1991. Vol. 2. – P. 49 – 53.
8. Соловьев, О.В. Методы изучения характеристик дальнего вихревого следа [Текст] / О.В. Соловьев, С.М. Еременко, В.В. Чмовж // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України : наук. техн. журн. – 2013. – № 4 (13). – С. 26 – 29.
9. Aircraft wake turbulence and its detection 141 [Text] / Edited by Olsen et all Plenum Press. New York, 1970.
10. Hallock, J.N. Eberle editors. Aircraft wake vortices [Text] / J.N. Hallock // Astate - of - art review of the United States R&D program. Final report N FAA-RD- 77-23, 1977.
11. Preliminary results of flight test of vortex attenuating splines [Text] / E.C. Hastings, R.E. Shanks, R.A. Champine, etc. // NASA TMX-71928, 1974.
12. Mc.Cormick, B.W. Structure of trailing vortices [Text] / B.W. Mc.Cormick, J.L. Tangler, H.E. Sherrieb // Aircraft, vol.5, N3, May – June 1968.
13. Zamyatin, A.N. Full scale studies of structure in atmospheric boundary layer [Text] / A.N. Zamyatin, V.C. Gratchov // 14-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. ICAS Proceedings. – 1984. Toulouse, France. – Vol. 2. – P. 1235 – 1240.
14. Zamyatin, A.N. Methods of studying an airplane vortex wake structure in flight at low altitudes [Text] / A.N. Zamyatin, Y.A. Zaversnev, V.C. Kushnerev // International Wake Wortex Symposium, Oktober 29 – 31, 1991.
15. Zamyatin, A. N. Real reseach of defferent class airplane vortex wakes at low altitudes [Text] / A.N. Zamyatin // International Wake Wortex Symposium, Oktober 29 – 31, 1991.
16. Proceedings of the aircraft wake vortices conference. Vol. 2, Washington, D.C., USA, 1991.
17. Ахманов, С.А. Доплеровские инфракрасные лазерные системы для дистанционного измерения ветровых потоков [Текст] / С.А. Ахманов, Л.А. Косовский, Г.А. Погосов // Изв. АН СССР. – 1991. – Т. 55. – № 2.
18. Hugnet, M.P. Low level wing detection system for airport landing approach areas on the Bertin Doppler acoustic (SoDAR) [Text] / M.P. Hugnet, R. Zanelli, J. Fage // International conference of the aviation weather system of the American Meteorological society. Montreal QUE, Canada, May 1981.
19. Зелей, С. Исследование вихрей в следе с помощью термоанемометра и вихремметра [Текст] / С. Зелей // Ракетная техника и космонавтика. – 1976. – Т. 14, № 5. – С. 179 – 181.
20. Лезиус, Д. Исследование затухания концевых вихрей в гидроканале [Текст] / Д. Лезиус // Ракетная техника и космонавтика. – 1974. – Т. 12. – № 8. – С. 75 – 83.
21. Кибардин, Ю.А. Физика спутного следа [Текст] / Ю.А. Кибардин, А.М. Киселев // Авиация и космонавтика. – 1978. – № 3 – 4.
22. Филатов, Г.А. Безопасность полётов в возмущённой атмосфере [Текст] / Г.А. Филатов, Г.С. Пуминова, П.А. Сельвестров. – М. : Транспорт, 1992. – 272 с.
23. Кибардин, Ю. А. В спутном следе [Текст] / Ю.А. Кибардин, А. М. Киселёв // Авиация и космонавтика. – 1978. – № 4.
24. Белоцерковский, С.М. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей [Текст] / С.М. Белоцерковский, А.С. Гиневский. – М. : Физматлит, 1995. – 367 с.
25. Вышинский В.В. Вихревой след самолёта в турбулентной атмосфере / В.В. Вышинский, Г.Г. Судаков // Труды ЦАГИ. – 2006. – Вып. 2667. -155 с.
26. Гайфулин, А.М. Исследование вихревых структур, образующихся при обтекании тел жидкостью или газом [Текст] / А.М. Гайфулин. – М. : Изд-во ЦАГИ, 2006. – 138 с.
27. Соловьев, О.В. Анализ процесса формирования вихревых следов за летательным аппаратом [Текст] / О.В. Соловьев, В.Н. Кобрин, В.В. Чмовж // Системы озброєння і військова техніка. – X. : Харк. ун-т пов. сил ім. Івана Кожедуба, 2013. – № 2 (34). – С. 93 – 98.

Надійшла до редколегії 3.11.2014

**Рецензент:** канд. техн. наук проф. Ю.І. Миргород, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОГО РІВНЯ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ В УМОВАХ ДІЇ ВИХРОВИХ СЛІДІВ

О.В. Соловйов, П.В. Прусак, Н.В. Кобріна

Коротко розглядається можливість розробки єдиного підходу у оцінюванні ступеня вихрової безпеки для повітряних суден в районі великого аероузла. Показана актуальність досліджень супутніх і вихрових слідів в районі аеродрому. Проведено аналіз існуючих методів досліджень характеристик супутніх і вихрових слідів. Показані напрямки в розробці системи вихрової обстановки в районі аеропорту.

**Ключові слова:** літальний апарат, супутній слід, метод дискретних вихорів.

## TARGET LEVEL OF SAFETY PROVIDING IN THE EFFECTS OF VORTEX WAKES

O.V. Solovyov, P.V. Prusak, N.V. Kobrina

The possibility of a common methodological approach developing in assessment of vortex safety for aircraft in the air-drome area is briefly considered. The urgency of trial lines and vortex wakes research in the terminal area is showed. The analysis of existing research methods of trial lines and vortex wakes characteristics is carried out. The directions in the development of the vortex conditions system near the airport are showed.

**Keywords:** aircraft, vortex wake, method of discrete vortices.