

УДК 629.7.015.7

С.М. Еременко, О.В. Соловьев, В.В. Чмовж

*Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНОГО ВИХРЕВОГО СЛЕДА**

*В работе рассматриваются вопросы формирования вихревого следа за самолетом и обеспечения безопасности полетов в районе аэроузлов. Показана актуальность исследований вихревых следов с учетом правил и рекомендаций ИКАО. Проведен анализ методов изучения вихревых следов. Представлены алгоритмы расчета характеристик вихревого следа с использованием метода дискретных вихрей. Показаны качественные картины вихревого следа за самолетом типа Ан-74.*

**Ключевые слова:** самолет, вихревой след, метод дискретных вихрей.

**Введение**

В конце XX века перед ведущими авиационными государствами встала актуальная проблема по обеспечению потребной пропускной способности крупных аэроузлов при прогнозируемом увеличении объема воздушных перевозок к 2015г. в 2...3 раза со снижением авиационных происшествий не менее чем в 3 раза. Одной из основных проблем реализации повышения интенсивности воздушного движения в районе крупных аэроузлов является обеспечение вихревой безопасности полетов. Суть проблемы вихревой безопасности полетов заключается в физике явлений, возникающих в процессе обтекания несущих и управляющих поверхностей летательных аппаратов, вследствие чего генерируется долгоживущий вихревой след. Вихревые следы представляют значительную опасность для летательных аппаратов, вошедших в зону их воздействия, что, как правило, чревато для них серьезными проблемами. Например, протяженность вихревого следа, сгенерированного магистральным самолетом, в зависимости от состояния атмосферы может достигать 10...12км, иногда – до 15км, на больших удалениях от самолёта-генератора вихревого следа – он затухает или разрушается. Это связано с диссипацией энергии следа и других явлений. На больших высотах полёта самолёта-генератора вихревого следа возможна его визуализация за счёт эффекта конденсации водяных паров, истекающих из реактивных сопел двигателей силовой установки, в других условиях вихревой след может быть невидимым.

**Обеспечение заданного уровня безопасности полётов**

Характеристики вихревого следа зависят от аэродинамической компоновки, полётного веса, состояния атмосферы, высоты полёта и режима обтекания самолёта-генератора. Как правило, вихревой след представляет собой пару мощных вихрей с противоположным направлением вращения, кото-

рые, интерферируя, опускаются ниже высоты полёта самолёта-генератора на 50...300м, а также могут смещаться в горизонтальной плоскости под действием боковой составляющей ветра или влияния плоскости раздела сред (рис. 1).



Рис. 1. Вихревой след за самолетом Boeing-727 (Фото NASA, 1974г.)

Существует проблема интерференции вихревых следов с плоскостью раздела сред, т.е. с подстилающей поверхностью лётного поля аэродрома при выполнении взлётно-посадочных операций, которая связана с ростом интенсивности полётов в его районе (рис. 2).



Рис. 2. Вихревой след за самолетом во время посадки

Эта проблема является актуальной для стран ЕС, США, России, Китая и Индии. Учёт интерференции вихревого следа с плоскостью раздела сред в невязком приближении даёт известный результат, согласно

которому вихревой след за самолётом и его зеркальное отображение относительно плоскости раздела сред образует квадруполь, что вызывает движение вихрей следа вдоль поверхности земли в противоположных направлениях. Экспериментальные исследования в аэродинамических трубах установили, что при движении вихревого следа вдоль поверхности раздела сред наблюдается так называемый “отскок” вихрей до некоторой высоты над землёй и движении по спиралевидной траектории. Было показано, что спиралевидная траектория движения вихрей следа над землёй обусловлено отрывом пограничного слоя с поверхности раздела сред и образованием вторичных вихрей с противоположным направлением вращения.

При выполнении взлётно-посадочных операций с одной взлётно-посадочной полосы (ВПП) или близко расположенных параллельных ВПП установленный временной интервал составляет 2...3 мин. В действительности, часто при взлётно-посадочных операциях вихревой след под воздействием внешних возмущений быстро уходит из зоны ВПП, не вызывая опасности входа в него последующих летательных аппаратов. Исходя из этого, временные интервалы между летательными аппаратами могут быть сокращены до 20...30 с. При неблагоприятных внешних условиях в районе ВПП вихревой след может “зависать” в районе ВПП и представлять существенную опасность для других летательных аппаратов. Например, при боковой составляющей ветра 1...2 м/с один из вихрей следа может “зависнуть” над ВПП на несколько минут.

Действующие правила ИКАО определяют временное эшелонирование летательных аппаратов, выполняющих полёт в одном направлении по условиям предотвращения входа в вихревой след. Согласно этим правилам минимальное расстояние определяется типом летательного аппарата. Все типы летательных аппаратов условно разделены на три класса по полётному весу: лёгкие – до 7 т, средние – от 7 т до 136 т и тяжёлые – свыше 136 т. Исходя из

этого, минимальные расстояния между летательными аппаратами, летящими в одном направлении, являются фиксированными и составляют, например, 4 морские мили (7,4 км) для тяжёлых летательных аппаратов, летящих за тяжёлым летательным аппаратом (рис. 3), и 6 морских миль (11 км) – для лёгкого летательного аппарата, летящего за тяжёлым.

Появление на воздушных линиях тяжёлых самолётов типа А-380 вызывает необходимость увеличения безопасных интервалов между летательными аппаратами. Согласно рекомендациям ИКАО (ICAO Report “Wake Vortex aspects of the Airbus A-380 aircraft” 11/10/2005: Т 13/3-05-0661.SLG , для летательных аппаратов, следующих за А-380, интервалы горизонтального эшелонирования равны интервалам для соответствующих самолётов, следующих за тяжёлым самолётом, увеличены на 2 морские мили (3,7 км), если это тяжёлый летательный аппарат, и на 4 морские мили (7,4 км), если последующий летательный аппарат – средний или лёгкий.

Нормами ИКАО регламентировано вертикальное эшелонирование летательных аппаратов на маршруте. Острая необходимость увеличения пропускной способности воздушных линий вызвала введение шести дополнительных эшелонов по высоте (программа RVSM) и введению на них минимального вертикального эшелонирования 1000 футов (300 м), вместо существовавших 2000 футов (610 м).

Мировое авиационное сообщество для координации действий по разработке и созданию систем вихревой безопасности проводит научно-практические конференции с целью повышения эффективности управления воздушным движением и обеспечения заданного уровня безопасности полётов на фоне решения проблемы вихревых следов. На основе этих проблем ИКАО сформулировало требования к перспективным системам предупреждения вихревой опасности, которые изложены в “Руководстве по обслуживанию воздушного движения” (ICAO Doc 9426, Part II, Chapter 3, Appendix A).

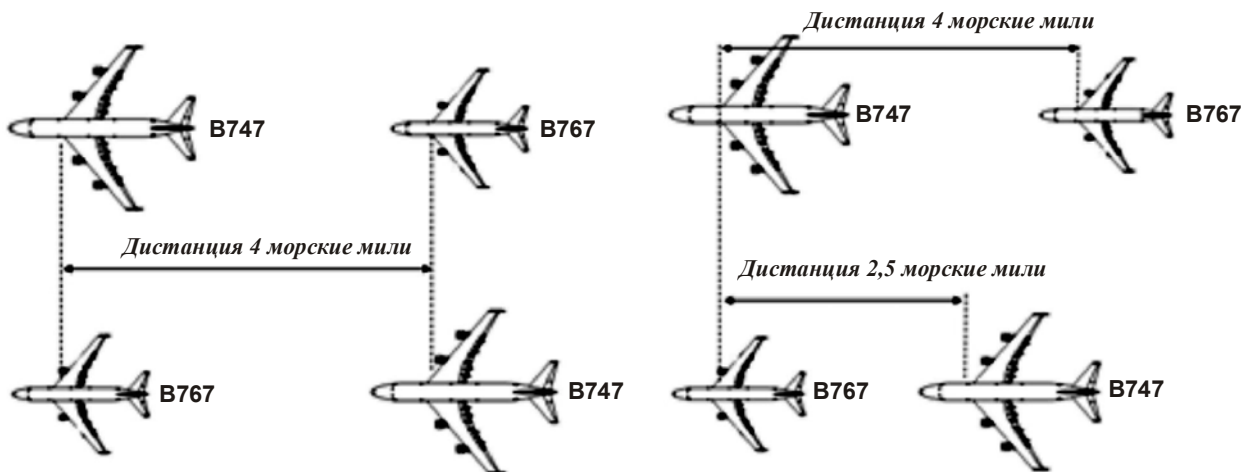


Рис. 3. Безопасные интервалы между летательными аппаратами

Там же указано, что системы предупреждения о вихревой опасности должны иметь наземную и бортовую системы. Указано, что фиксированные минимумы эшелонирования по вихревой безопасности заменяются на временные минимумы, соответствующие конкретным метеорологическим условиям и конкретным летательным аппаратам, летящим в одном направлении. Кроме того, система предупреждения вихревой опасности должна обнаруживать опасные зоны, сгенерированные вихревым следом, что приведёт к снижению нагрузок на лётный состав и диспетчерскую службу управления воздушным движением. Таким образом, технологии CNS/ATM ИКАО являются перспективным средством обеспечения эффективности систем организации воздушного движения, и согласно глобальному плану ИКАО подлежат внедрению во всём мире к 2020г. как обязательная технологическая компонента управления воздушным движением.

### Методы изучения вихревых следов

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 [1, 2]. 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. Экспериментальные методы исследования характеристик вихревых следов основаны на моделировании течений в аэродинамических трубах (рис. 4), в лётных экспериментах (рис. 5), а также с использованием лидарных измерений [6].

С.М. Белоцерковский в своих работах [3, 4] предложил использовать метод дискретных вихрей (МДВ) для математического моделирования и исследования характеристик вихревых следов за летательными аппаратами [5].

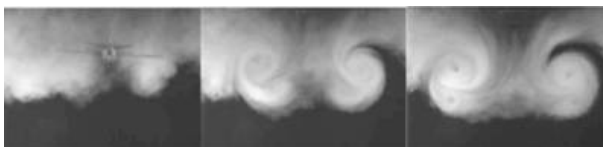


Рис. 4. Формирование вихревого следа



Рис. 5. Лётный эксперимент по изучению вихревых следов

МДВ позволяет получать аэродинамические характеристики, как при безотрывном, так и отрывном обтекании несущих поверхностей летательных аппаратов и успешно сочетается с теорией нестационарного ламинарного и турбулентного пограничного слоя [7]. Важной особенностью МДВ при математическом моделировании течений является возможность получения аэродинамических характеристик самолёта-генератора вихревого следа и характеристик собственно вихревого следа. Кроме того, важным преимуществом математических моделей на базе МДВ является их оперативность и время получения результатов расчёта при достаточной их достоверности [8]. Это позволяет с успехом использовать МДВ для моделирования и исследований характеристик вихревых следов.

Задача расчёта характеристик дальнего вихревого следа может быть решена в два этапа. Алгоритмы расчёта характеристик дальнего вихревого следа за самолётами с реактивной и турбовинтовой силовой установкой представлены блок-схемой на рис. 6.

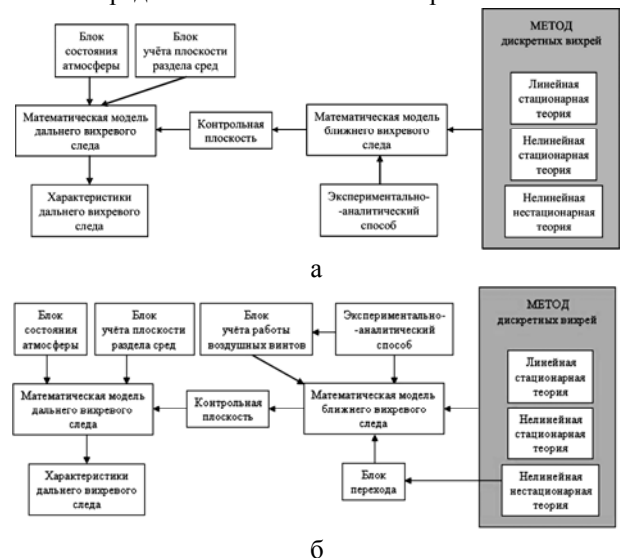


Рис. 6. Блок-схемы алгоритмов расчёта характеристик дальнего вихревого следа: а – самолета с реактивными двигателями; б – самолета с винтовыми двигателями

Пример расчёта характеристик спутного следа (1-й этап) за самолётом типа Ан-74 представлен на рис. 7. Полученные, таким образом, характеристики спутного следа за самолётом-генератором, являются исходными данными для получения характеристик вихревого следа (2-й этап). На рис. 8 представлен пример расчёта пространственного положения вихревого следа за самолётом-генератором типа Ан-74. Расчётное удаление – 7,4км на высоте  $H=6$ км. Представленное пространственное положение вихревого следа, получено при отсутствии боковой составляющей ветра  $W=0$ , в спокойной атмосфере.

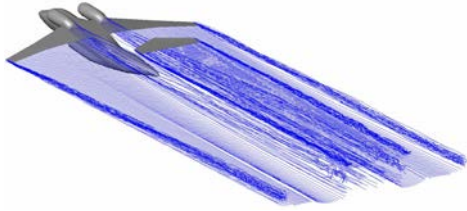


Рис. 7. Спутный след за самолётом типа Ан-72 ( $\alpha = 6^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $x/l = 2.5$ ).

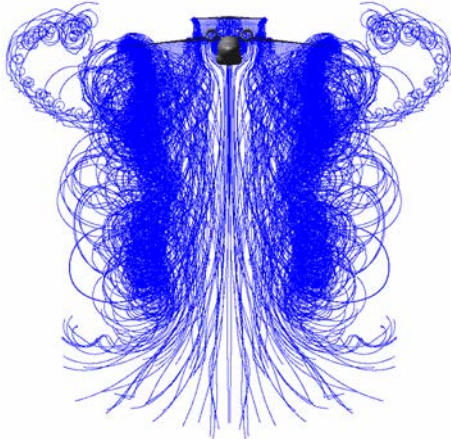


Рис. 8. Моделирование вихревого следа за самолётом Ан-74

Таким образом, имея пространственное положение вихревого следа и пространственно-временное распределение циркуляции за самолётом-генератором, можно получить, так называемые турбулентные характеристики следа.

## МЕТОДИ ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНОГО ВИХРОВОГО СЛІДУ

С.М. Єременко, О.В. Соловійов, В.В. Чмовж

*У роботі розглядаються питання формування вихрового сліду за літаком та забезпечення безпеки польотів в районі аеропортів. Показано актуальність досліджень вихрових слідів з урахуванням правил і рекомендацій ІКАО. Проведено аналіз методів вивчення вихрових слідів. Представлені алгоритми розрахунку характеристик вихрового сліду з використанням методу дискретних вихорів. Показані якісні картини вихрового сліду за літаком типу Ан-74.*

**Ключові слова:** літак, вихровий слід, метод дискретних вихорів.

## METHODS OF DESCRIPTIONS STUDY OF DISTANT VORTEX WAKE

S.B. Eryomenko, O.V. Solovyov, V.V. Chmovzh

*The paper deals with the formation of the vortex wake of aircraft and flight safety around airports. Actuality of research vortex wakes with the rules and recommendations of the ICAO is shown. The analysis methods for the study of vortex wakes is accomplished. Algorithms for calculating the characteristics of the vortex wake using the discrete vortex method is produced. The qualitative picture of the vortex wake behind an airplane An-74 are shown.*

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

## Заклучение

В статье рассмотрены проблемы, связанные с дальним вихревым следом, методами получения его характеристик, а также один из подходов математического моделирования дальнего вихревого следа на базе МДВ.

Таким образом, получение характеристик вихревых следов особо актуально для обеспечения заданного уровня безопасности полётов в районе крупных аэроузлов, зонах ожидания, при полётах плотными строями и полётах по маршруту.

## Список литературы

1. Вышинский, В.В. Вихревой след самолёта в турбулентной атмосфере [Текст] / В.В. Вышинский, Г.Г. Судаков. – Труды ЦАГИ, вып. 2667, 2006. – 155 с.
2. Гайфулин, А.М. Исследование вихревых структур, образующихся при обтекании тел жидкостью или газом [Текст] / А.М. Гайфулин. – М.: Изд. ЦАГИ, 2006. – 138 с.
3. Нелинейная теория крыла и её приложения [Текст] / Т.О. Аубакиров, С.М. Белоцерковский, А.И. Желанников, М.И. Ништ. – Алматы: Гьлым, 1997. – 448 с.
4. Белоцерковский, С.М. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью [Текст] / С.М. Белоцерковский, М.И. Ништ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
5. Спутные следы и их воздействие на летательные аппараты. Моделирование на ЭВМ [Текст] / Т.О. Аубакиров, А.И. Желанников, П.Е. Иванов, М.И. Ништ. – Алматы: Гьлым, 1999. – 280 с.
6. Замятин, А.Н. Натурные исследования структуры и развития вихревого следа среднемагистрального самолёта в приземном слое атмосферы [Текст] / А.Н. Замятин, Ю.А. Завершинев – Научно-технический сборник ЛИИ, № 163, 1984. – 87 с.
7. Математическое моделирование отрывного обтекания тел [Текст] / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И. Ништ, Р.М. Фёдоров. – М.: Наука, 1988. – 232 с.
8. Vortex methods and their application to trailing wake vortex simulations [Текст] / G. Winckelmans, R. Cocle, L. Dufresne, R. Capart. – Comptes Rendus Physique (2005) 6 (4/5), Special issue on Aircraft trailing vortices, P. 467–486.

Поступила в редколлегию 11.10.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.В. Тюрёв, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.