

УДК 629.7.015.7

В.Н. Кобрин, О.В. Соловьев, В.В. Чмовж

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ СЛЕДОВ ЗА ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

*Кратко рассматривается физика явления, обуславливающая формирование и развитие вихревых следов и методы исследований их характеристик. Показана актуальность исследований спутных и вихревых следов. Проведён анализ существующих численных методов исследования характеристик спутных и вихревых следов, а также получения аэродинамических характеристик летательных аппаратов, вошедших в них. Определён метод математического моделирования вихревых следов. Показаны направления в изучении характеристик спутных и вихревых следов.*

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

### Введение

Исследования вихревых следов за различными летательными аппаратами (ЛА), особенно за магистральными и транспортными самолётами, представляют научный и практический интерес. Сходящие с задних кромок несущих поверхностей ЛА, вихревые следы представляют собой долго “живущие” вихревые структуры, которые “затухают” на удалении от ЛА - генератора спутного следа порядка 10 ... 15 км и более (рис. 1). Вход в спутный след ЛА, особенно для ЛА с меньшим полётным весом, чревато катастрофическими последствиями. Особую актуальность имеет процесс дозаправки топливом в полёте из-за возможности входа заправляемого самолёта в ближний вихревой след самолёта-заправщика.

Очень важны исследования вихревых следов ЛА на взлётно-посадочных режимах, когда они перемещаются над поверхностью раздела сред, что представляется потенциальной опасностью для ЛА, выполняющих взлётно-посадочные операции. Изучение вихревых следов особенно важно для аэропортов и крупных аэроузлов, где возможность воздействия спутного следа на ЛА является причиной ограничения их пропускной способности.

По статистическим данным ИКАО, около 20% от всех лётных происшествий происходят из-за воздействия внешней среды, в том числе и лётные происшествия, связанные с воздействием спутного следа на ЛА. В соответствии с данными, приведёнными в “Aviation Week & Space Technology”, 26.08.2002., ежегодно происходит более 30% авиационных происшествий, связанных с воздействием спутного следа на ЛА.



Рис. 1. Вихревой след за магистральным самолетом

Неблагоприятные явления в атмосфере, такие как сдвиг ветра, турбулентность в приземном слое и спутный след, изменяют силы и моменты, действующие на ЛА, вызывают его возмущённое движение, что в свою очередь, может привести к лётным происшествиям [23].

### Особенности формирования и развития вихревых следов

С точки зрения характерных особенностей формирования и развития спутного следа за самолетом-генератором, его схематично можно разделить на зоны: 1 – зона формирования; 2 – устойчивая зона; 3 – зона разрушения (рис. 2).

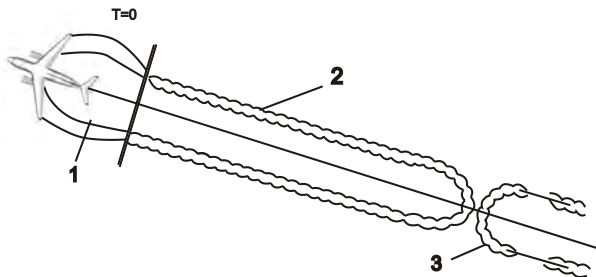


Рис. 2. Зоны спутного следа

Протяженность зоны формирования невелика и приблизительно равна 2...2,5 размаха крыла самолета-генератора. Разброс в значениях зоны формирования спутного следа зависит от режима полета самолета-генератора, аэродинамической компоновки и полетной конфигурации крыла;

Началом устойчивой зоны можно считать сечение за ЛА, когда процесс сворачивания вихревой пелены завершился образованием устойчивых вихревых жгутов. Этот момент и будет являться началом отсчета времени существования спутного следа, т.е.  $T = 0$  (см. рис. 2).

При визуализации спутного следа в устойчивой зоне за самолетами в крейсерской конфигурации отчетливо видны два вихревых жгута, имеющих противоположное вращение вовнутрь. Интенсивность их одинакова при  $\beta = 0$ .

Структуру следа можно охарактеризовать рядом геометрических и кинематических параметров (рис. 3).

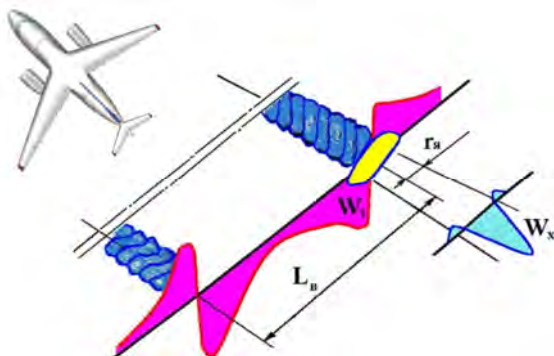


Рис. 3. Структура спутного следа

Расстояние между осями вихрей  $L_B$  зависит от формы крыла в плане и угла атаки  $\alpha$ .

Скорость возмущенного движения воздуха в спутном следе определяется интенсивностью концевых вихрей. В отдельном изолированном концевом вихре течение можно рассматривать как осе симметричное относительно оси концевого вихря.

В центре концевого вихря образуется вязкое ядро, радиус которого зависит от геометрии крыла, расположения двигателей, режима полета.

Поле осевых скоростей ограничено в основном областью вязкого ядра концевого жгута. В лётных экспериментах с использованием для визуализации концевых вихрей дыма или частиц гелия осевое течение наблюдалось как в сторону движения самолета, так и в противоположную сторону. Причем имели место случаи, когда на различных расстояниях от самолета-генератора в одном и том же вихревом жгуте направление осевых течений менялось на противоположное.

Поле окружных скоростей образует скос потока вниз в области между вихрями и скос потока вверх в наружной относительно вихрей области. Максимальные значения окружных скоростей могут достигать до 50% от скорости полета самолета-генератора.

Область спутного следа вне вязкого ядра концевого жгута представляет собой течение, близкое к двумерному, и определяется окружными скоростями.

По результатам лётных экспериментов установлено, что снижение спутного следа происходит неравномерно. На начальном участке движения спутный след снижается интенсивно, затем темп снижения замедляется и вихри зависают на определенной высоте. Как показал анализ имеющихся данных летного эксперимента, опускание следа для различных типов ЛА не превышало 250 метров (рис. 4)

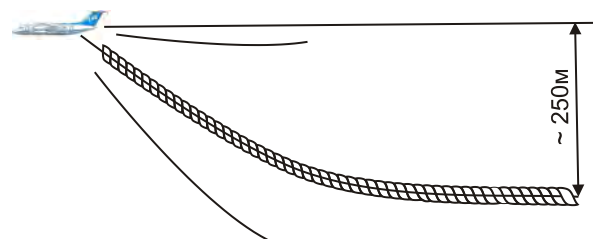


Рис. 4. Область возможного положения концевых вихрей спутного следа

Скорость снижения вихрей зависит от атмосферных условий, причем наибольшее влияние оказывает ветер, восходящие и нисходящие потоки и температура воздуха.

Зона разрушения спутного следа. Летные эксперименты позволили установить принципиально различные механизмы разрушения концевых вихрей: вследствие волновой неустойчивости; вследст-

вие интенсивной турбулизации ядра вихря ("взрыв" ядра вихря); вязкое затухание.

При волновой неустойчивости возникают деформации концевых вихрей в виде волн. Начальные деформации вихревых жгутов обусловлены собственными возмущениями, связанными с процессом формирования вихрей, и атмосферной турбулентностью, масштаб которой соизмерим с размахом крыла самолета-генератора. По мере увеличения времени существования спутного следа вследствие взаимной индукции вихрей деформации нарастают, что приводит к соединению вихрей и образованию замкнутых вихревых колец (рис. 2). В последующее время происходит быстрое разрушение вихревых структур, оставшиеся беспорядочные возмущения не представляют угрозы для других ЛА [16...18, 23].

Летные эксперименты позволили установить еще один механизм разрушения спутного следа -

"взрыв" ядра вихря [24, 25] (рис. 5). Физическая природа возникновения "взрыва" ядра вихря связана с наличием осевых скоростей и их изменением в течении времени. "Взрыв" ядра вихря, для одиночного концевого вихря, не означает полного разрушения вихря, после "взрыва" вихревой жгут может быть достаточно интенсивным. Только после серии "взрывов" вихревой жгут теряет организованную структуру и превращается в безопасный для самолетов турбулизированный поток. Другой вихрь не разрушаясь, может существовать в атмосфере длительное время.

Явлению "взрыва" могут предшествовать волновые колебания. Как показали летные эксперименты, "взрыв" может возникать при наибольших и наименьших расстояниях между осями вихрей. Наиболее вероятным представляется возникновение "взрыва" в местах наибольшего искривления осей вихрей.

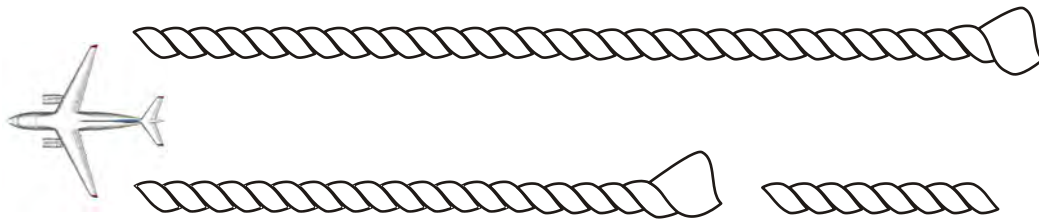


Рис. 5. Разрушение концевого вихря при "взрыве" ядра

### Методы исследований вихревых следов

Первые исследования в этой области столкнулись с рядом трудностей, часть из которых не преодолена до настоящего времени. Структура воздушного потока в спутном следе оказалась достаточно сложной и зависимой от множества факторов, среди которых выделяются главные:

- аэродинамическая компоновка самолета-генератора;
- полётная масса ЛА;
- режим полёта ЛА;
- состояние атмосферы.

Наиболее достоверные сведения о спутном аэродинамическом следе можно получить в лётном эксперименте. Как показал опыт исследований, такие эксперименты имеют большую стоимость и небезопасны. Тем не менее, основные сведения о спутных следах были получены именно в лётных экспериментах. Большинство исследований в этом направлении выполнено в Лётном исследовательском институте имени Громова, где разработаны специальные методики проведения лётных экспериментов и обработки экспериментальных данных. Известны работы Замятина А.Н., Щитаева Н.Г., Березкина Е.Т. [20, 26].

Теоретические исследования вихревых следов ЛА интенсивно развиваются в ведущих авиацион-

ных государствах. При этом используются различные методы математического моделирования турбулентных течений: прямое численное моделирование на основе уравнений Навье-Стокса, а также моделирование крупных вихрей с использованием уравнений Навье-Стокса в сочетании с учётом подсеточных масштабов, с использованием уравнений Рейнольдса при их замыкании дифференциальными моделями турбулентности.

Исследования спутных следов на основе инженерных методов проводились в Московском государственном техническом университете гражданской авиации Пуминовой Г.С., Филатовым Г.А., Сельвестровым П.В. [23].

Наиболее перспективным и эффективным путем исследования спутных следов и их воздействия на другие ЛА является математическое моделирование на ЭВМ. Первые работы в этом направлении выполнены в ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского профессором Кибардиным Ю.А. [16 ... 18]. В основе его моделей лежал метод дискретных вихрей [6], основные положения которого разработаны профессором Белоцерковским С.М. [7 ... 9].

### Анализ численных методов

Анализ методов численной аэродинамики, использующихся в отечественной и зарубежной практике проектирования, показал, что в наибольшей мере изложенным требованиям отвечает метод дис-

кретных вихрей (МДВ) и его модификации. Более того, МДВ может эффективно использоваться для решения широкого круга задач математической физики относительно гармонического потенциала [9, 11, 19 и др.], а его модификации, базирующиеся на фундаментальных идеях метода, позволяющих строить численные решения для потенциала, удовлетворяющего уравнению Гельмгольца. Современная методология МДВ изложена в ряде монографий [1 ... 10], часть которых переведена и издана за рубежом. «Качество» результатов, полученных с использованием МДВ, является достаточно высоким, что подтверждается сходимостью многочисленных данных при физических и численных экспериментах. Реализация принципа «оптимальной неточности» или, точнее обеспечения заданной точности результатов при минимальных затратах, в случае применения МДВ не представляет затруднений. Это объясняется тем, что МДВ и его модификации позволяют использовать схематизации и модели различного уровня [21, 22]:

- модели среды: идеальная несжимаемая, идеальная сжимаемая, локально вязкая (в пределах пограничных слоев и слоев смешения), вязкая;
- модели ЛА: пластинчатая (бесконечно малой толщины), малой толщины (с линеаризацией по толщине), телесная (конечной толщины), смешанная;
- схемы обтекания: безотрывное, отрывное с фиксированными местами отрыва (невязкий отрыв), отрывное с вязким отрывом, смешанное;
- виды течений: установившееся (стационарное), гармонически меняющееся по времени, неустановившееся (нестационарное);
- уровни приближений: линейное, квазилинейное (с частичной линеаризацией), нелинейное.

Прикладные программы, базирующиеся на МДВ, предусматривают максимально полное (в рамках принятых допущений) моделирование процесса обтекания, что обеспечивает им эвристические свойства. С помощью соответствующих математических моделей были получены фундаментальные результаты по выявлению особенностей обтекания аэродинамических компоновок с крыльями изменяемой геометрии и сложной формы в плане [1], трансформации струй и следов [9] и т.д.

Обоснованный выбор численного метода сам по себе не гарантирует высокой эффективности расчётной программы (программного комплекса). Качество программного продукта в значительной мере зависит от методики его создания.

Разработанные методики основывались на предположениях и методических приёмах, которые ограничивали возможности расчёта характеристик дальнего спутного следа:

- расчёт характеристик дальнего спутного следа проводился за одиночным летательным аппаратом;

- не учитывалась интерференция концевых вихрей, сошедших с боковых и кормовых кромок несущих поверхностей и механизации задней кромки крыла;

- диффузия вихрей учитывалась приближённо;
- при расчёте характеристик дальнего спутного следа не учитывались особенности аэродинамической компоновки и конфигурация ЛА, стратификация и турбулентность атмосферы, скорость и профиль ветра.

### Воздействие спутных следов на летательные аппараты

Вход ЛА в спутный след сопровождается изменением местных скоростей обтекания, что приводит к возникновению дополнительных, неуравновешенных сил и моментов, а, следовательно, к отклонению ЛА от исходной траектории полета (рис. 6). Воздействие спутного следа на ЛА и его последующее движение зависит от целого ряда факторов:

- аэродинамических характеристик, режим полета самолета-генератора и самолета, вошедшего в спутный след;
- расстояния между самолетом-генератором и самолетом, вошедшим в спутный след;
- атмосферных условий.

Случаи, когда ЛА входит в спутный след под малыми углами к оси концевой вихря, могут привести к лётным происшествиям. Такой характер входа наиболее вероятен в режиме захода на посадку или в наборе высоты при выполнении взлета, когда спутный след самолета-генератора "зависает" или уменьшается свою скорость движения относительно оси ВПП под воздействием боковой составляющей скорости ветра, или под воздействием "экрана" земли. При стандартных атмосферных условиях вход в спутный след возможен, когда впереди летящий самолет выполнил уход на второй круг или "конвейер". В начальный момент времени спутный след от него будет располагаться выше траектории захода на посадку следующего за ним самолета, но со временем в соответствии с закономерностями опускания спутного следа концевые вихри могут оказаться на траектории полета самолета, выполняющего заход на посадку. Условия входа ЛА в спутный след можно охарактеризовать углами входа  $\Psi$  и  $\Theta$  (рис. 7).

Случаи, когда ЛА входит в спутный след под малыми углами к оси концевой вихря, могут привести к лётным происшествиям. Такой характер входа наиболее вероятен в режиме захода на посадку или в наборе высоты при выполнении взлета, когда спутный след самолета-генератора "зависает" или уменьшается свою скорость движения относительно оси ВПП под воздействием боковой составляющей скорости ветра, или под воздействием "экрана" земли.

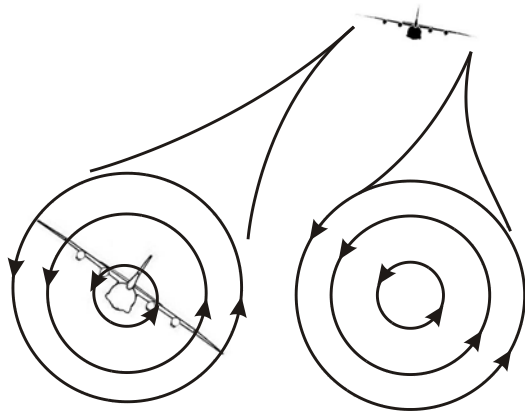


Рис. 6. Воздействие спутного следа на ЛА

При стандартных атмосферных условиях вход в спутный след возможен, когда впереди летящий самолет выполнил уход на второй круг или "конвейер". В начальный момент времени спутный след от него будет располагаться выше траектории захода на посадку следующего за ним самолета, но со временем в соответствии с закономерностями опускания спутного следа концевые вихри могут оказаться на траектории полета самолета, выполняющего заход на посадку. Условия входа ЛА в спутный след можно охарактеризовать углами входа  $\Psi$  и  $\Theta$  (рис. 7).

Изменение аэродинамических сил и моментов при входе ЛА в спутный след связано с изменением местных скоростей обтекания. Характер обтекания ЛА определяется параметрами концевых вихрей и их положением относительно самолета, вошедшего в спутный след.

Для определения аэродинамических сил и моментов, воздействующих на ЛА при входе в

спутный след используются экспериментальные и расчётные методы [16 – 20, 26].

На несущих поверхностях ЛА индуцируемые концевыми вихрями скорости приводят к изменению местных скоростей набегающего потока и образованию дополнительных местных углов атаки  $\Delta\alpha$  и скольжения  $\Delta\beta$ :

$$\Delta\alpha \approx W_{yb} / V_0;$$

$$\Delta\beta \approx W_{zb} / V_0,$$

где  $W_{yb}$ ,  $W_{zb}$  - составляющие индуцируемой концевыми вихрями скорости в проекции на плоскость симметрии ЛА и вдоль размаха крыла соответственно.

На изменение аэродинамических сил и моментов существенное влияние оказывает взаимное положение ЛА и концевых вихрей спутного следа [16].

### Выводы

1. Задача по определению характеристик вихревых следов является актуальной и представляет огромный научно технический интерес.

2. Наиболее подходящим методом математического моделирования и расчета характеристик вихревых следов является МДВ, в силу адекватности математической модели и ее соответствия физическим особенностям движениям жидкости внутри вихревого следа.

3. Основываясь на метаматематической модели воздействия вихревых следов, возможно определение опасных зон для летательных аппаратов, следующих за самолетом-генератором вихревого следа.

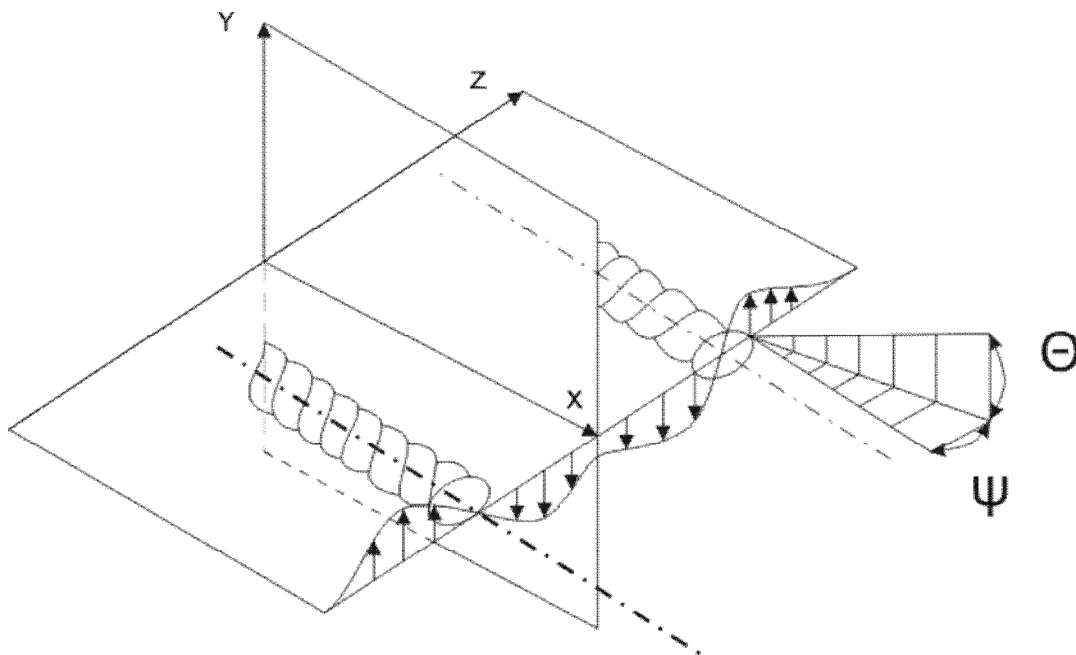


Рис. 7. Условия входа в зону спутного следа

## Список литературы

1. Нелинейная теория крыла и ее приложения [Текст] / Т.О. Аубакиров, С.М. Белоцерковский, А.И. Желанников, М.И. Нишит. – Алматы : Гылым, 1997. – 448 с.
2. Спутные следы и их воздействие на летательные аппараты. Моделирование на ЭВМ [Текст] / Т.О. Аубакиров, А.И. Желанников, П. Е. Иванов, М. И. Нишит. – Алматы : Гылым, 1999. -- 280 с.
3. Аэродинамическая компоновка и характеристики ЛА [Текст] : под ред. М. И. Ништа. – М. : Машиностроение, 1991. – 255 с.
4. Аэродинамическое проектирование летательных аппаратов [Текст] : учебное пособие под ред. В. И. Халыко. – Харьков, ХАИ, 1985. – 189 с.
5. Струи и несущие поверхности. Моделирование на ЭВМ [Текст] / В.И. Бабкин, С.М. Белоцерковский, В.В. Гуляев, А.В. Дворак. -- М. : Наука, 1989. – 208 с.
6. Белоцерковский, С. М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа [Текст] / С. М. Белоцерковский. -- М. : Наука, 1965. – 242 с.
7. Моделирование отрывных течений на ЭВМ [Текст] / О.М. Белоцерковский, С.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов, М.И. Нишит. – М. : Кибернетика, 1984. – 120 с.
8. 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.
9. Моделирование на ЭВМ турбулентных струй и следов. Проблемы турбулентных течений [Текст] / С.М. Белоцерковский, А.В. Дворак, А.И. Желанников, В.Н. Котовский. – М. : Наука, 1987. – 367 с.
10. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел [Текст] / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И. Нишит, Р.М. Федоров. – М. : Наука, 1988. – 231 с.
11. Белоцерковский, С.М. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике [Текст] / С.М. Белоцерковский, И.К. Лифанов. – М. : Наука, 1985. – 252 с.
12. Белоцерковский, С.М. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью [Текст] / С.М. Белоцерковский, М.И. Нишит. – М. : Наука, 1978. – 351 с.
13. Белоцерковский, С. М. Аэродинамические производные летательного аппарата и крыла при дозвуковых скоростях [Текст] / С.М. Белоцерковский, Б.К. Скрипач. – М. : Наука, 1975. – 424 с.
14. Аэродинамическая компоновка и характеристики летательных аппаратов [Текст] / В.И. Бушуев, Ф.И. Ганиев, Б.Е. Локтев, М.И. Нишит, А.Д. Шамиурин. – М. : Машиностроение, 1991. – 255 с.
15. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости [Текст] / О.Г. Гоман, В.И. Карпюк, М.И. Нишит, А.Г. Судаков. – М. : Машиностроение, 1993. – 288 с.
16. Кибардин, Ю.А. В спутном следе [Текст] / Ю.А. Кибардин, А.М. Киселёв // *Авиация и космонавтика*. – 1978. – № 4.
17. Кибардин, Ю.А. Физика спутного следа [Текст] / Ю.А. Кибардин, А.М. Киселёв // *Авиация и космонавтика*. – 1978. -- №3.
18. Кибардин, Ю.А. Физика спутного следа [Текст] / Ю.А. Кибардин, А.М. Киселёв // *Авиация и космонавтика*. – 1978. -- №4.
19. Лифанов, И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент [Текст] : моногр. / И.К.Лифанов. -- М. : ТОО Янус, 1995. – 521 с.
20. Методы аэродинамических исследований в полёте [Текст]: справочная библиотека авиационного инженера-испытателя / А.Д. Миронов, А.Н. Замятин, А.В. Роднов, А.А. Королёв, М.Г. Фомин. -- М. : Машиностроение. – 1985. – 108 с.
21. Нишит, М.И. Вычислительная аэродинамика [Текст] / М.И. Нишит // *Полет*. – 1999. – № 5.
22. Нишит, М.И. Математические модели аэродинамики летательных аппаратов [Текст] / М.И. Нишит // *Полет*. – 1998. – №8.
23. Филатов, Г.А. Безопасность полётов в возмущённой атмосфере [Текст] / Г.А. Филатов, Г.С. Пуминова, П.А. Сельвестров. – М. : Транспорт, 1992. – 272 с.
24. Owen, P. Aircraft vortex wakes and the effects on aircraft [Text] / P. Owen, F. Dee // *ICAO Circular, 92 - AN/76*. – P. 69 – 73.
25. Tomback, I. Observations of atmospheric effects on vortex wake behavior [Текст] / I. Tomback // *J. Aircraft*. – 1973. – vol. 10, N 11. – P. 641 – 646.
26. Zamyatin, A .N. Full scale studies of structure in atmospheric boundary layer [Текст] / A.N. Zamyatin, V.C. Gratchov // *14-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. ICAS Proceedings*. – 1984. – Vol. 2. Toulouse, France. – P. 1235 – 1240.

Поступила в редколлегию 3.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Х.В. Раковский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ВИХРОВИХ СЛІДІВ ЗА ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

В.М. Кобрін, О.В. Соловійов, В.В. Чмовж

Коротко розглядається фізика явища, яка обумовить формування і розвиток вихрових слідів і методи досліджень їх характеристик. Показано актуальність досліджень спутних і вихрових слідів. Проведено аналіз існуючих чисельних методів дослідження характеристик спутних і вихрових слідів, а також отримання аеродинамічних характеристик літальних апаратів, що увійшли до них. Визначено метод математичного моделювання вихрових слідів. Показані напрямки у вивченні характеристик спутних і вихрових слідів.

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

## ANALYSIS OF FORMING WAKE VORTEX PROCESS BEHIND AIRCRAFT

V.M. Kobrin, O.V. Solovyov, V.V. Chmovzh

Physics of the phenomenon causing formation and development of the wake vortices, and also methods of investigating their characteristics are considered briefly. Timeliness of investigating the vortex paths and wake vortices is shown. Analysis of existing numerical methods for investigating the characteristics of vortex paths and wake vortices and also getting aerodynamic characteristics of aircraft is accomplished. Wake vortex mathematical modeling method is defined. Directions for studying characteristics of vortex paths and wake vortices are explained.

**Key words:** aircraft, wake vortex, discrete vortex method.