

УДК 629.7.015.7

О. В. СОЛОВЬЕВ¹, П. В. ПРУСАК², Н. В. КОБРИНА²

¹ ГП «Чугуевский авиационный ремонтный завод», Украина

² Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

СТРУКТУРА ВИХРЕВЫХ СЛЕДОВ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

Исследованы вихревые следы летательных аппаратов на взлетно-посадочных режимах, когда они перемещаются над поверхностью раздела сред. Изучены неблагоприятные внешние условия, влияющие на безопасность полетов. Рассмотрен процесс формирования и развития вихревых следов за летательными аппаратами. Проанализированы зона неустойчивого вихревого следа и зона разрушения вихревого следа. Описаны факторы, влияющие на динамику движения летательного аппарата. Показаны особенности движения летательного аппарата в вихревом следе и проблемы обеспечения безопасности полетов в условиях его воздействия.

Ключевые слова: неблагоприятные внешние условия, спутный след, вихревой след, летательный аппарат, взлетно-посадочные режимы, аэродинамические характеристики.

Введение

Проблема обеспечения потребной пропускной способности крупных аэроузлов при прогнозируемом увеличении объема воздушных перевозок со снижением авиационных происшествий является актуальной [1...3]. Одной из основных задач повышения интенсивности воздушного движения в районе крупных аэроузлов является обеспечение вихревой безопасности полетов. Очень важны исследования вихревых следов летательных аппаратов (ЛА) на взлетно-посадочных режимах, когда они перемещаются над поверхностью раздела сред, что представляется потенциальной опасностью для ЛА, выполняющих взлетно-посадочные операции [4, 5].

Протяжённость вихревого следа, сгенерированного магистральным самолётом в зависимости от

состояния атмосферы, может достигать 10...12 км, иногда – до 15 км. На больших удалениях от самолёта-генератора вихревого следа он затухает или разрушается [6, 7]. Это связано с диссипацией энергии следа и других явлений.

Постановка задачи исследования

Неблагоприятные условия внешней среды могут привести к различным по своему воздействию на ЛА последствиям, которые влияют на благоприятный исход полёта.

Такие явления в атмосфере, как сдвиг ветра, турбулентность, вертикальные потоки, ливневые осадки, вихревые следы, изменяют аэродинамические силы и моменты, действующие на ЛА, что приводит к его возмущённому движению (рис. 1).

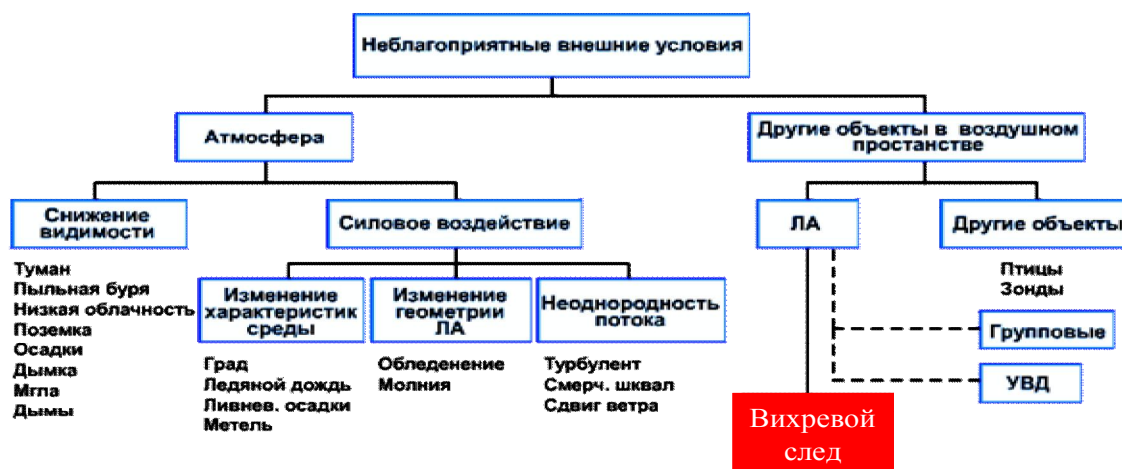


Рис. 1. Неблагоприятные условия, влияющие на безопасность полётов

Характер возмущённого течения в вихревом следе, его перемещение в пространстве подчиняется определённым закономерностям и зависит от лётно-технических характеристик и режима полёта ЛА–генератора вихревого следа, а также от времени ”жизни” вихревого следа.

Основная часть

Вихревой след. Формирование. Структура

Аэродинамический след – область вихревого течения за ЛА, телом [1]. Характерной чертой любого течения жидкости или газообразной среды является малая скорость затухания возмущений в аэродинамическом следе далеко за обтекаемым телом.

Вихревое течение в аэродинамическом следе – одно из наиболее сложных явлений гидродинамики.

В зависимости от чисел Рейнольдса Re и Маха M_∞ реализуются различные формы движения среды. Условно аэродинамический след рассматривают (рис. 2) как ближний (спутный след) и дальний (вихревой след).

Формирования вихревого следа

Ближний след непосредственно примыкает к обтекаемому телу и характеризуется отличием давления в нём от давления невозмущённого потока. Как правило, течение среды в ближнем следе нестационарное и имеет особенности отрывного течения, т.е. содержит область “обратных токов” [2]. В дальнем следе давление быстро выравнивается с давлением невозмущённого потока, а выравнивание возмущённой скорости происходит несравненно более медленно (рис. 3).

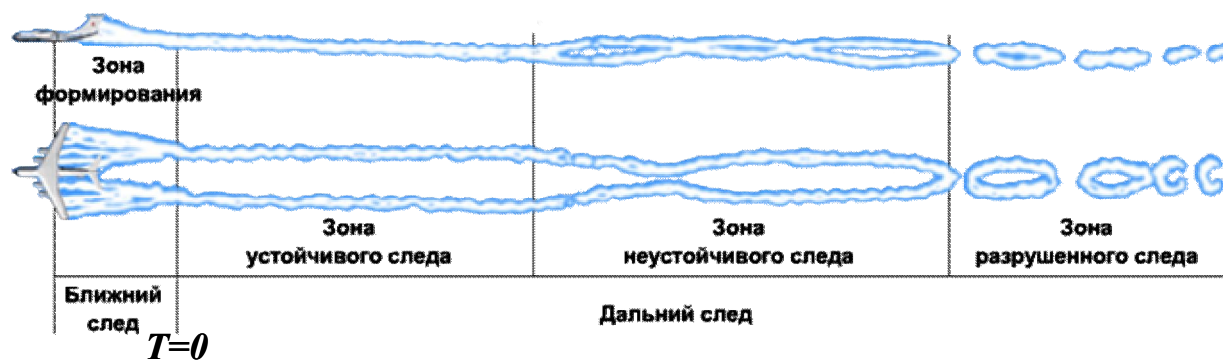


Рис. 2. Структура вихревого следа



Рис. 3. Характер течения в вихревом следе

Структура возмущённого потока в вихревом следе (см. рис. 2) достаточно сложна и зависит от множества факторов, среди которых выделяются главные:

- аэродинамическая компоновка ЛА-генератора вихревого следа;
- полётная масса ЛА;
- режим обтекания ЛА;
- реактивные струи газов, истекающих из сопел двигателей силовой установки ЛА;
- состояние атмосферы.

Вклад перечисленных компонент в формирование и развитие вихревого следа различен. Основной вклад в формирование вихревого следа за ЛА и его результирующие характеристики вносят концевые вихри, сходящие с крыла, горизонтального оперения, других несущих и управляющих поверхностей.

В зоне формирования вихревого следа происходит сворачивание вихревой пелены, сошедшей с несущих и управляющих поверхностей ЛА в два и более мощных концевых вихря. Протяжённость зоны формирования вихревого следа может составлять 1,5...3 размаха крыла ЛА [3]. Протяжённость зоны формирования вихревого следа можно оценить по формуле:

$$\bar{l}_{\text{вф}} = K \frac{\lambda}{c_{\text{ya}}}, \quad (1)$$

где λ – удлинение крыла самолёта-генератора спутного следа; c_{ya} – коэффициент подъёмной силы самолёта-генератора спутного следа; K – константа, учитывающая характер погонной нагрузки крыла самолёта-генератора спутного следа (для случая

эллиптической погонной нагрузки крыла $K \approx 0,28$). Из (1) видно, что протяжённость зоны формирования вихревого следа зависит от режима полёта самолёта-генератора, его аэродинамической компоновки и конфигурации крыла (наличие в потоке механизации передней и/или задней кромок крыла).

Устойчивая зона вихревого следа

Началом **устойчивой зоны** можно считать сечение за ЛА, когда процесс сворачивания вихревой пелены завершился образованием устойчивых вихревых жгутов. Этот момент является началом отсчёта времени существования вихревого следа $T = 0$ (см. рис. 2). В устойчивой зоне за самолётами в крейсерской конфигурации отчетливо видны два вихревых жгута, имеющих противоположное вращение, направленное вовнутрь. Интенсивность их одинакова в случае, когда скольжение отсутствует ($\beta = 0$), рис. 4.

Расстояние между осями вихрей $L_{\text{в}}$ зависит от формы крыла в плане и угла атаки α . На умеренных углах атаки относительное расстояние между осями вихрей равно $\bar{L}_{\text{в}} = L_{\text{в}}/l \approx 0,8$. Скорость возмущённого течения в вихревом следе определяется интенсивностью концевых вихрей. В отдельном изолированном концевом вихре течение можно рассматривать как осесимметричное относительно его оси. В центре концевых вихря образуется вязкое ядро, радиус которого зависит от геометрических характеристик крыла, расположения двигателей силовой установки, режима полёта.



Рис. 4. Вихревые следы ($\beta \approx 0^\circ$)

Поле осевых скоростей ограничено областью вязкого ядра концевых вихрей. Визуализация концевых вихрей с помощью дыма или частиц гелия показала, что осевое течение наблюдалось как в сторону движения самолёта-генератора вихревого следа, так и в противоположную сторону [3]. Имели место случаи, когда на различных расстояниях от самолёта-генератора в одном и том же вихре направление осевых течений изменялось на противоположное.

Поле окружных скоростей образует скос потока вниз между концевыми вихрями (рис. 5) и скос потока вверх в наружной относительно вихрей области. Максимальные значения окружных скоростей могут достигать до 50% от скорости полёта самолёта-генератора.

Область вихревого следа вне вязкого ядра представляет собой течение, близкое к двумерному, и определяется окружными скоростями. На начальном участке движения вихревой след снижается интенсивно, затем темп его снижения замедляется и

концевые вихри “зависают” на высоте, примерно 50...150 метров ниже высоты полёта самолёта-генератора [7].

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

Зона неустойчивого вихревого следа характерна начальными деформациями концевых вихрей, что обусловлено собственными возмущениями и атмосферной турбулентностью, масштаб которой соизмерим с размахом крыла самолёта-генератора. По мере увеличения времени существования вихревого следа вследствие взаимной индукции концевых вихрей деформации нарастают, что приводит к соединению вихрей и образованию замкнутых вихревых колец (рис. 6). В дальнейшем происходит разрушение вихревых структур, оставшиеся беспорядочные возмущения не представляют угрозы для других ЛА [3].



Рис. 5. Визуализация скоса потока между концевыми вихрями



а



б

Рис. 6. Разрушение вихревого следа (волновая неустойчивость, “взрыв” ядра концевых вихрей)

Зона разрушения вихревого следа характерна различными механизмами разрушения концевых вихрей:

- волновая неустойчивости;
- интенсивная турбулизация ядра вихря ("взрыв" ядра вихря);
- вязкое затухание.

Лётные эксперименты позволили установить механизм "взрыва" ядра вихря [5, 6] (рис. 6, б). Физическая природа "взрыва" ядра вихря связана с наличием осевых составляющих скорости и их изменением с течением времени. **"Взрыв" ядра вихря**, для одиночного концевого вихря, не означает полного его разрушения, 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 его волновые колебания. Как показали лётные эксперименты, "взрыв" может возникать при наибольших и наименьших расстояниях между осями вихрей. Наиболее вероятным представляется возникновение "взрыва" в местах наибольшего искривления осей вихрей.

Факторы, влияющие на динамику движения летательного аппарата

Вход ЛА в вихревой след сопровождается изменением местных скоростей его обтекания, что приводит к возникновению дополнительных, неуравновешенных аэродинамических сил и моментов, а, следовательно, к отклонению ЛА от исходной траектории полёта. Воздействие вихревого следа на

ЛА и его последующее движение зависит от ряда факторов:

- аэродинамических характеристик, режима полёта самолёта-генератора и самолёта, вошедшего в вихревой след;
- расстояния между самолётом-генератором и самолётом, вошедшим в вихревой след;
- атмосферных условий.

Случаи, когда ЛА входит в вихревой след с малыми углами к оси концевого вихря, могут привести к лётным происшествиям. Такой характер входа наиболее вероятен в режиме захода на посадку или при выполнении взлёта и набора высоты (рис. 7, 8), когда вихревой след самолёта-генератора "зависает" или уменьшает свою скорость движения относительно оси ВПП под воздействием боковой составляющей скорости ветра, под воздействием "экрана" земли.

В стандартных атмосферных условиях вход в вихревой след возможен, когда впереди летящий самолёт выполнил уход на второй круг или "конвейер". В начальный момент времени вихревой след от него будет располагаться выше траектории захода на посадку следующего за ним самолёта, но со временем в соответствии с закономерностями опускания вихревого следа концевые вихри могут оказаться на траектории полёта самолёта, выполняющего заход на посадку. Условия входа ЛА в вихревой след можно охарактеризовать углами входа Ψ и Θ (рис. 9).

Характер обтекания ЛА определяется параметрами концевых вихрей и их положением относительно самолёта, вошедшего в вихревой след. Для определения аэродинамических сил и моментов, действующих на ЛА при входе в вихревой след используются экспериментальные и расчётные методы [7, 8].



Рис. 7. Авиационные происшествия по фазам полёта [4]



Рис. 8. Вихревой след самолёта при посадочной конфигурации крыла

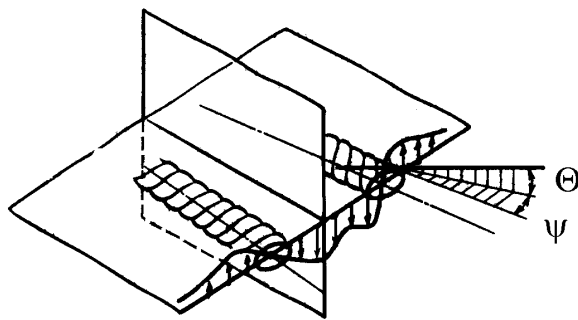


Рис. 9. Условия входа в зону вихревого следа

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

$$\Delta\alpha \approx W_{y_b} / V_0 ; \Delta\beta \approx W_{z_b} / V_0 ,$$

где W_{y_b}, W_{z_b} – составляющие индуцируемой концевыми вихрями возмущённой скорости в проекции на плоскость симметрии ЛА и вдоль размаха крыла соответственно.

Особенности движения летательного аппарата в вихревом следе

Рассмотрим пример воздействия вихревого следа на самолёт. Если самолёт вошёл в зону I вихревого следа (рис. 10) или подходит к ней справа, он испытывает момент крена, направленный вправо. В результате самолёт “отбрасывается” со значительной перегрузкой от зоны концевых вихря с угловой скоростью до $200^\circ/\text{с}$. Потеря высоты может достигать до 150...200м. Вход самолёта в зону II сопровождается левым креном до 130° . Зона III вихревого следа вызывает правый крен самолёта. В этом случае самолёт может испытать настолько сильное воздействие возмущённого течения в следе, что для его парирования может не хватить эффективности рулевых поверхностей.

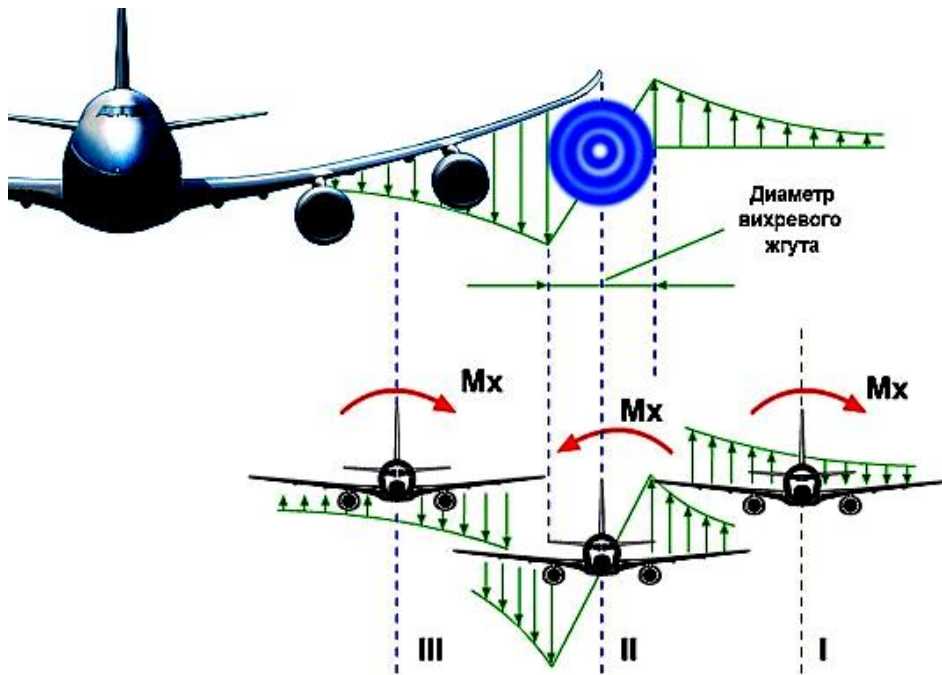


Рис. 10. Пример воздействия вихревого следа на самолёт

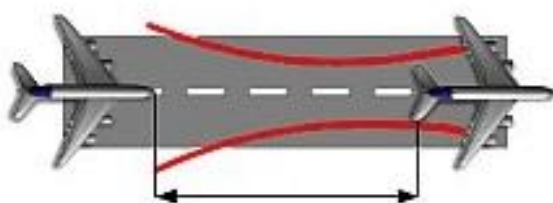
Особенности вихревого следа при наличии плоскости раздела сред

Актуальность проблемы вихревых следов определяется обеспечением заданного уровня безопасности полётов при выполнении взлётно-посадочных операций в районе крупных аэроузлов, где эксплуатируются самолёты различных классов. При выполнении взлётно-посадочных операций вероятность входа в вихревой след увеличивается, т.к. временные интервалы могут быть неоправданно малыми (в зависимости от погодных условий, состояния атмосферы, аэродинамических характеристик ЛА), а траектории движения самолётов могут совпадать. Кроме того, неблагоприятное воздействие вихревого следа на самолёт, выполняющий взлётно-посадочные операции определяется:

- малым запасом высоты полёта для парирования возмущений от вихревого следа;
- отсутствием запаса скорости полёта (при выполнении взлёта);
- малой эффективностью рулевых поверхностей при парировании возмущений, вызванных вихревым следом (при выполнении взлёта);
- возможностью сваливания самолёта в штопор из-за наведённого дополнительного схода потока на его несущих и управляющих поверхностях, т.к. на взлётно-посадочных режимах полёта, как правило, полётные углы атаки велики;
- малыми промежутками времени для восприятия возмущений экипажем ЛА, принятия решения и парирования этих возмущений.

Выполнение взлётно-посадочных операций сопровождается:

- генерацией вихревого следа, состоящего, как правило, из нескольких пар концевых вихрей при выпуске взлётно-посадочной механизации крыла (рис. 8);
- пространственным перемещением концевых вихрей (рис. 11, а);
- развитием неустойчивости вихревого следа вследствие влияния плоскости раздела сред (земли);



а

– влиянием метеорологических условий в районе ВПП, когда наиболее существенное влияние на пространственное движение вихревого следа оказывает боковая составляющая скорости ветра (рис. 11, б).

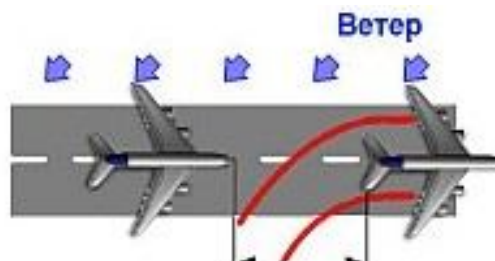
Проблемы обеспечения вихревой безопасности полётов

Рост интенсивности воздушного движения [10] (рис. 12, 13), особенно в районах крупных аэроузлов определил круг проблем по изучению закономерностей образования и развития вихревых следов за различными летательными аппаратами (ЛА) на рубеже 50-х годов XX столетия. Однако исследования в этой области столкнулись с рядом трудностей, часть из которых не решена до сих пор. Несмотря на усилия мирового авиационного сообщества, проблема обеспечения вихревой безопасности полётов продолжает быть актуальной. За последние годы в мире произошли авиационные катастрофы и инциденты с различной степенью тяжести по причине входа самолётов в вихревой след [4].

Выводы

В результате рассмотрения условий формирования вихревых следов за летательными аппаратами и их структуры показано воздействие вихревого следа на летательный аппарат.

Анализ условий обеспечения заданного уровня безопасности полётов показывает, что задача гарантирования вихревой безопасности полётов продолжает быть актуальной.



б

Рис. 11. Влияние “земли” и метеоусловий на пространственное положение вихревого следа

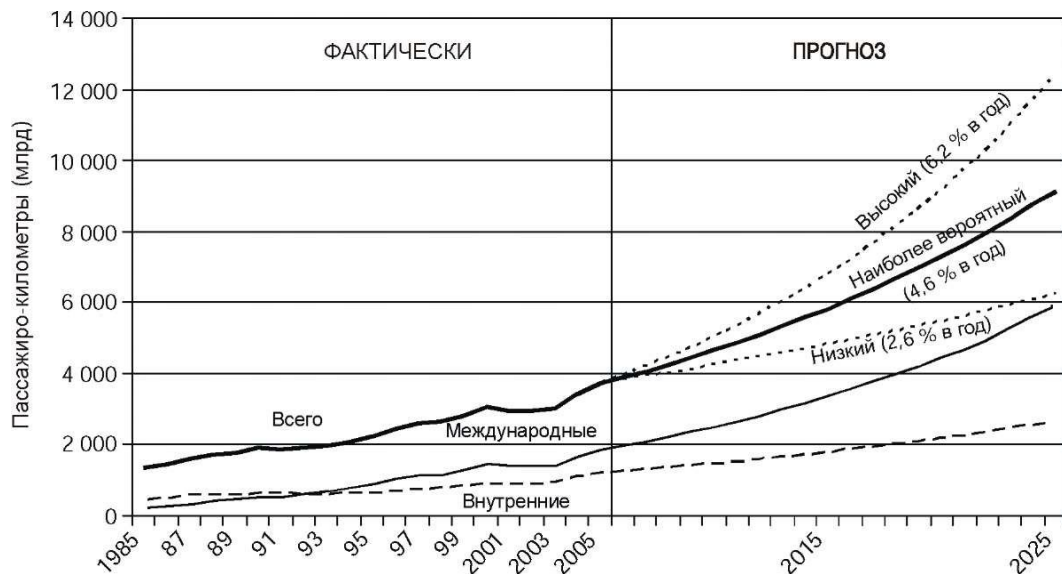


Рис. 12. Тенденция развития регулярных пассажирских перевозок: весь мир (1985 ... 2025гг [10])

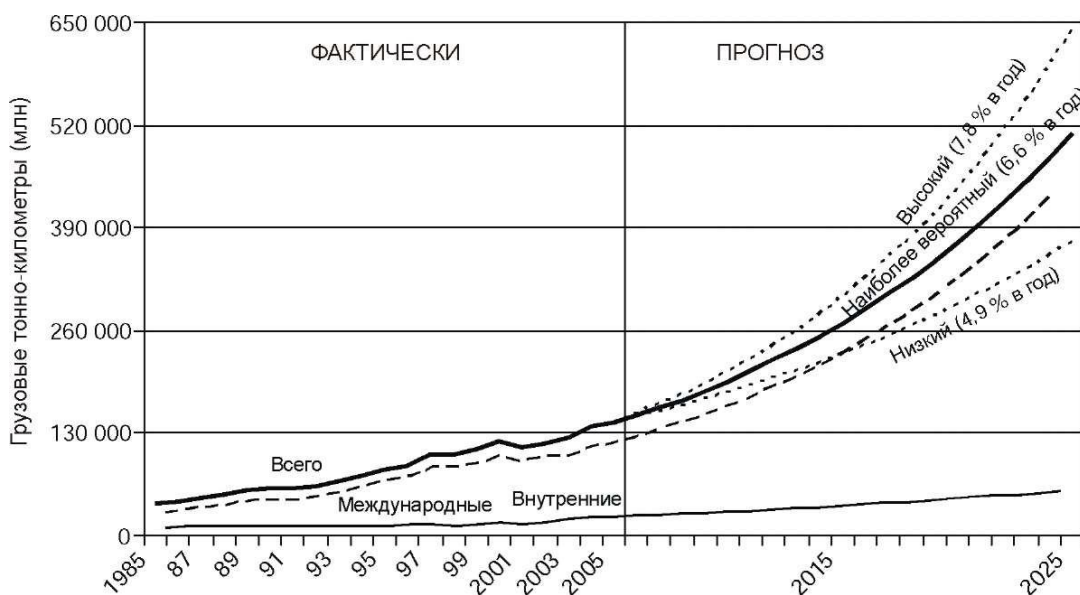


Рис. 13. Тенденция развития регулярных грузовых перевозок: весь мир (1985 ... 2025гг [11])

Литература

1. Соловьёв, О. В. Методы изучения характеристик дальнего вихревого следа [Текст] / О. В. Соловьёв, С. М. Ерёменко, В. В. Чмовж // Наука і техніка повітряних сил Збройних Сил України. – 2013. – 4 (13). – С. 26–29.

2. Owen, P. Aircraft vortex wakes and the effects on aircraft [Text] / P. Owen, F. Dee // ICAO Circular. – 1992. – № AN/76. – P. 69–73.

3. Соловьёв, О. В. Анализ процесса формирования вихревых следов за летательным аппаратом [Текст] / О. В. Соловьёв, В. Н. Кобрин, В. В. Чмовж // Системи озброєння і військова техніка : зб. наук. праць. – Вип. 2 (34). – X., ХУПС, 2013. – С. 93–98.

4. 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.

5. Замятин, А. Н. Натурные исследования структуры и развития вихревого следа среднемаг-

стрального самолёта в приземном слое атмосферы [Текст] / А. Н. Замятин, А. Завершинев // Научно-технический сборник летно-исследовательского института. – 1984. – № 163. – 87 с.

6. Филатов, Г. А. Безопасность полётов в возмущённой атмосфере [Текст] / Г. А. Филатов, Г. С. Пуминова, П. А. Сельвестров. – М. : Транспорт, 1992. – 272 с.

7. Tomback, I. Observations of atmospheric effects on vortex wake behavior [Text] / I. Tomback // Aircraft. – 1973. – Vol. 1, N 11. – P. 641 – 646.

8. Авиация [Текст] / гл. ред. Г. П. Свищев // Большая Российская энциклопедия (ЦАГИ). – М. : Машиностроение, 1994. – 736 с.

9. Чжен, П. К. Отрывные течения [Текст] / пер. с англ. / П. К. Чжен. – М. : Мир, 1973. – Т. 2. – 279 с.

10. ИКАО, Cir 313, AT/134. Прогноз развития воздушного транспорта до 2025 года [Текст] / МОГА. – 2007. – 56 с.

Поступила в редакцию 3.02.2015, рассмотрена на редколлегии 15.05.2015

СТРУКТУРА ВИХРОВИХ СЛІДІВ ТА ЇХ ДІЯ НА ЛІТАЛЬНІ АПАРАТАТИ

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

Досліджено вихрові сліди літальних апаратів на злітно-посадочних режимах, коли вони переміщуються над поверхнею розділу середовищ. Вивчено несприятливі зовнішні умови, що впливають на безпеку польотів. Розглянуто процес формування та розвитку вихрових слідів за літальними апаратами. Проаналізовано зону нестійкого вихрового сліду і зону руйнування вихрового сліду. Описано фактори, що впливають на динаміку руху літального апарата. Показано особливості руху літального апарату в вихровому сліді і проблеми забезпечення безпеки польотів в умовах його дії.

Ключові слова: незадовільні зовнішні умови, супутній слід, вихровий слід, літальний апарат, взльотно-посадкові режими, аеродинамічні характеристики.

WAKES STRUCTURE AND THEIR IMPACT ON AIRCRAFT

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

Wake vortex of the aircrafts was investigated during takeoff and landing. The adverse external conditions affecting flight safety were studied. The process of formation and development wake vortex of aircraft was reviewed. Zone of unstable wake vortex and zone destruction of vortex wake were analyzed. The factors affecting to dynamics of the movement of the aircraft were described. The features of the aircraft moving in the wake vortex and through it issues of ensuring flight safety were displayed.

Keywords: adverse external conditions, trial line, vortex wake, aircraft, takeoff and landing modes, aerodynamic characteristics.

Соловьев Олег Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., директор ГП «Чугуевский авиационный ремонтный завод», Украина, e-mail: kandidat1@bk.ru.

Прусак Павел Викторович – аспирант кафедры экологии и экспертизных технологий, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: pavloaero@gmail.com.

Кобринна Наталья Витальевна – канд. техн. наук, доцент кафедры автомобилей и транспортной инфраструктуры, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kobrina_nv@mail.ru.