

С.М. Еременко¹, П.В. Прусак¹, В.В. Соколова¹, О.В. Соловьёв²

(¹Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", ²Чугуевский авиаремонтный завод; e-mail: k106@mail.ru)

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПЛОСКОСТИ РАЗДЕЛА СРЕД НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ ВИХРЕВОГО СЛЕДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В интересах решения экологических задач проведена оценка влияния внешних возмущений на возникновение, развитие и время "жизни" вихревого следа пролетевшего летательного аппарата.

Ключевые слова: экологическая безопасность, распыление средств защиты, БПЛА, вихревой след, математическая модель.

S.M. Eremenko, P.V. Prusak, V.V. Sokolova, O.V. Solov'ev

THE INFLUENCE OF THE ATMOSPHERE CONDITION AND THE PLANE OF MEDIA SEPARATION ON LIFETIME WAKE VORTICES OF AIRCRAFT

In order to address the ecological problems assessed the influence of external disturbances on beginning, evolution and lifetime wake vortex of overflying aircraft.

Key words: environmental safety, spraying protection means, UAV, wake vortex, mathematical model.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 10 декабря 2014 г.

В настоящее время сложились объективные условия для использования **беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)** в гражданской сфере. Прогресс в области новых конструкционных материалов, силовых установок, источников питания, микроэлектроники и информационных технологий обеспечил возможность применения беспилотной авиации для решения обширного круга востребованных задач, где использование пилотируемой авиации экономически нецелесообразно или практически невозможно. В частности, это касается применения БПЛА при решении ряда гражданских задач, в том числе и экологических.

Современные беспилотные летательные аппараты являются наиболее перспективными средствами дистанционного зондирования и аэрокосмического мониторинга. Их использование позволяет при минимальных затратах своевременно реагировать на экстремальные ситуации в сложных погодных условиях, труднодоступной местности.

Перечень задач, перспективных для отработки методик экологических исследований путем мониторинга **окружающей природной среды (ОПС)** с помощью БПЛА, приведён в табл. 1.

**Перечень экологических задач, которые могут быть решены
путём мониторинга окружающей природной среды с помощью БПЛА**

Задача	Результат решения
Мониторинг источников загрязнения природной среды и оценка их влияния	Обнаружение загрязнений и аварийных сбросов, их локализация и определение площади разливов загрязняющих веществ
Инвентаризация свалок	Обнаружение несанкционированных мест складирования отходов, ландшафтная локализация свалок и оценка их влияния на ОПС
Определение мест несанкционированной хозяйственной деятельности	Обнаружение мест несанкционированной хозяйственной деятельности, определение площади и способа использования разработки природных ресурсов, места подъезда
Контроль состояния и динамики изменения аграрных ресурсов	Оценка посевов разных растительных культур, определение влажности почвы, прогноз урожая (по вегетационному индексу, содержанию влаги в почве и растительности)
Оценка состояния лесного покрова	Определение породного состава, состояния и площади лесного покрова, динамики за определенный период времени
Определение влияния объектов газо- и нефтедобычи на ОПС	Обнаружение загрязнений, их локализация, определение площади выбросов и разливов загрязняющих веществ
Мониторинг и прогнозирование угроз природного, техногенного, экологического характера	Выявление лесных пожаров, наводнений и других крупномасштабных опасных природных и техногенных явлений и процессов, уточнение связанной с ними обстановки, прогнозирование возможных последствий опасных явлений

Кроме экологических исследований, связанных с мониторингом ОПС, БПЛА могут доставлять грузы в труднодоступные места, распылять химические или биологически активные компоненты (табл. 2).

**Перечень экологических задач, которые могут быть решены
путём доставки грузов в труднодоступные места, распыления химических
или биологически активных компонентов с помощью БПЛА**

Задача	Результат решения
Распыление удобрений и пестицидов	Высокоточное и быстрое внесение удобрений или уничтожение вредителей дозированным количеством пестицидов
Очистка водной поверхности от разливов нефти и нефтепродуктов	Уничтожение нефтяных пятен при разливе нефти путём распыления биологических деструкторов
Защита сельскохозяйственных и лесных угодий биологическими средствами	Эффективная биологическая защита растений от вредных насекомых путём и выпуска на сельскохозяйственные и лесные угодья трихограммы – насекомого, которое уничтожает вредные виды совок, кукурузного и лугового мотыльков и других чешуйчатокрылых
Получение информации о загрязнении поверхностных вод	Получение достоверной информации о загрязнении поверхностных вод путём размещения биоиндикаторов на загрязнённых участках и снятия информации о степени их загрязнения

Как правило, препараты для очистки водной поверхности от разливов нефти и нефтепродуктов, защиты сельскохозяйственных и лесных угодий биологическими средствами вносятся при помощи БПЛА либо мелкими каплями, либо путём рассеивания биологических объектов (яиц, насекомых и т.д.), которые также имеют незначительные размеры и массу. Поэтому для решения задачи создания облака из вносимых компонентов и его дальнейшего осаждения необходимо знать характеристики дальнего вихревого следа, сгенерированного БПЛА в полете. Решить поставленную задачу можно с помощью математической модели дальнего вихревого следа, разработанной на кафедре аэродинамики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ".

Наблюдения за пространственным движением дальнего спутного следа показали, что время его "жизни" значительно зависит от боковой, продольной и вертикальной составляющих скорости ветра. Увеличение скорости ветра приводит к уменьшению времени "жизни" спутного следа. Анализ доступных материалов по влиянию скорости ветра показал, что независимо от типа *летательного аппарата (ЛА)* спутный след затухает по экспоненциальному закону (рис. 1, где показаны графики зависимости времени "жизни" концевых жгутов t от скорости ветра W для самолётов В-747 и CV-880).

Из рис. 1 видно, что время "жизни" спутного следа зависит и от взлетного веса ЛА.

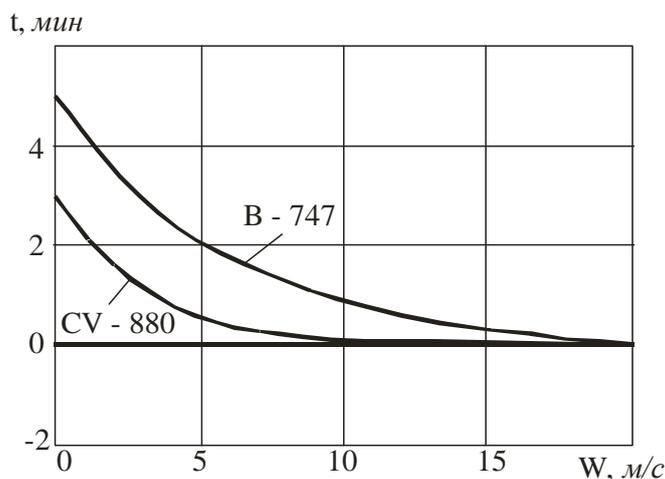


Рис. 1. Зависимость времени "жизни" концевых жгутов от скорости ветра для самолётов В-747 и CV-880

Анализ данных лётных экспериментов показал, что на время "жизни" спутного следа оказывает влияние плоскость раздела сред. Движение спутного следа вдоль подстилающей поверхности уменьшает время его "жизни" в среднем в 2-3 раза (табл. 3).

Влияние плоскости раздела сред на время "жизни" спутного следа

Тип самолёта	Большие высоты	Малые высоты
B-747	3,3 мин	1,0 мин
CV-880	1,5 мин	0,6 мин
Ty-154	3,0 мин	0,9 мин

Состояние атмосферы удобно оценивать с использованием числа Ричардсона

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\Delta \bar{T} / \Delta z}{\left(\frac{\Delta \bar{N}}{\Delta z} \right)^2}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения;

\bar{T} – средняя температура слоя толщиной Δz ;

$\frac{\Delta \bar{T}}{\Delta z}$ и $\frac{\Delta \bar{N}}{\Delta z}$ – средние градиенты температуры и горизонтальной составляющей скорости ветра в слое толщиной Δz .

Соотношения между Ri и состоянием атмосферы приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значение числа Ричардсона в зависимости от состояния атмосферы

Ri	Состояние атмосферы
< -1,0	Сильно неустойчивое
-1,0...-0,01	Неустойчивое
-0,01...0,01	Нейтральное
0,01...0,25	Устойчивое
> 0,25	Сильно устойчивое

В сильно неустойчивой атмосфере спутный след "живёт" несколько секунд (20...40 с), а в сильно устойчивой – несколько минут (5...7 мин).

Скорость и направление ветра – вероятностные характеристики, а их определение связано с некоторыми трудностями. Принято оперировать осредненными характеристиками ветра [1]. Средняя скорость ветра \bar{W} и её составляющие \bar{W}_x , \bar{W}_y , \bar{W}_z определяются интегралами

$$\bar{W}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{1}{\tau_n - \tau_0} \int_{\tau_0}^{\tau_n} W(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \tau) d\tau; \quad (2)$$

$$\bar{W}_{x,y,z}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{1}{\tau_n - \tau_0} \int_{\tau_0}^{\tau_n} W_{x,y,z}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \tau) d\tau,$$

где τ_0 – время начала осреднения характеристик;

τ_n – время конца осреднения.

На практике определение скорости и направления ветра производится путём периодических замеров приборами, установленными на высоте 10...12 м в одной или нескольких точках аэродрома. Зная параметры ветра в каждый из замеров и количество замеров N_3 , можно определить его среднюю скорость:

$$\bar{W}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} W_i(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \tau). \quad (3)$$

По выражениям, аналогичным (3), определяются и составляющие скорости ветра \bar{W}_x , \bar{W}_y , \bar{W}_z . В математической модели расчёта характеристик дальнего спутного следа учтены эти составляющие скорости ветра. Составляющие скорости ветра \bar{W}_y и \bar{W}_z учитываются непосредственно в расчёте соответствующих скоростей в сечении $y_a O z_a$:

$$\begin{aligned} \bar{W}_{y_{\Sigma}} &= \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{N_k} \frac{\Gamma_{ik}}{2\pi} \frac{\bar{z} - \bar{z}_{ik}}{\bar{R}_{ik}^2} \left[1 - e^{-\frac{\text{Re}_{ik}^* \bar{R}_{ik}^2}{4\tau_{ik}}} \right] + \bar{W}_{W_y}; \\ \bar{W}_{z_{\Sigma}} &= \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{N_k} \frac{\Gamma_{ik}}{2\pi} \frac{\bar{y} - \bar{y}_{ik}}{\bar{R}_{ik}^2} \left[1 - e^{-\frac{\text{Re}_{ik}^* \bar{R}_{ik}^2}{4\tau_{ik}}} \right] + \bar{W}_{W_z}; \\ \bar{R}_{ik}^2 &= (\bar{y} - \bar{y}_{ik})^2 + (\bar{z} - \bar{z}_{ik})^2, \quad \text{Re}_{ik}^* = \frac{V_0 b}{v_{ik}^*}. \end{aligned} \quad (4)$$

Осевая составляющая скорости ветра \bar{W}_x учитывается при расчёте безразмерного времени $\tau = \frac{(V_0 + W_x)t}{b_0}$.

В результате действия сил вязкости в нижних слоях атмосферы (на высотах 500...1000 м) скорость ветра вблизи земной поверхности отличается от скорости геострофического ветра. Различно также и направление ветра. Например, на высоте порядка 500 м скорость ветра примерно в два раза больше, чем на высоте флюгера (10 м) [2].

Установлено, что над ровной гладкой поверхностью, а в особенности над обширными водными поверхностями (над морями), скорость ветра при прочих равных условиях несколько больше, чем над сушей, имеющей различные неровности.

Очевидно, что распределение скорости ветра по высоте связано с изменением коэффициента турбулентности $k = k(H)$:

$$k = \frac{dW_w}{dH} = \frac{\tau_0}{\rho}, \quad (5)$$

где H – высота;

$$\tau_0 = \rho \left| k \frac{dW_w}{dH} \right|_{H \rightarrow 0}.$$

Введя в рассмотрение путь смещения l , запишем формулу для коэффициента турбулентности:

$$k = l^2 \frac{dW_w}{dH},$$

тогда

$$l^2 \left(\frac{dW_w}{dH} \right)^2 = \frac{\tau_0}{\rho} = v_*^2, \quad (6)$$

где $v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ – динамическая скорость, или скорость трения.

Таким образом, уравнение (5) принимает вид

$$dW_w = \frac{v_*}{k} \frac{dH}{H + z_0}. \quad (7)$$

Проинтегрировав (7) по высоте от $H = 0$ при $W_w = 0$ до $H = H$ при $W_w = W_w(H)$, получим

$$W_w(H) = \frac{v_*}{k} \ln \frac{H + z_0}{z_0}, \quad (8)$$

где z_0 – коэффициент шероховатости подстилающей поверхности (табл. 5).

Таблица 5

**Значение коэффициента шероховатости подстилающей поверхности
в зависимости от формы рельефа**

Форма рельефа	z_0 , см
Очень гладкая (грязевое болото, лед)	0,001
Гладкий снег	0,005
Песок	0,01...0,05
Ровный снежный покров	0,03...0,1
Пустыня	0,03
Паровое поле	0,5...3,0
Равнина, редкая трава высотой до 10 см	0,6...0,7
Степь, невысокая трава высотой до 6 см	3...3
Полупустыня, невысокая трава и кусты до 30 см	3...4
Пшеничное поле	3...7
Лес	30...100
Холм	130
Пригород	100...300
Город	400...700

Выражение (8) отражает закон распределения скорости ветра в приземном слое атмосферы [2]. Выражения для расчёта возмущённых скоростей принимают вид

$$\bar{W}_{y\Sigma} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{N_k} \frac{\bar{\Gamma}_{ik}}{2\pi} \frac{\bar{z} - \bar{z}_{ik}}{\bar{R}_{ik}^2} \left[1 - e^{-\frac{\text{Re}_{ik}^+ \bar{R}_{ik}^2}{4\tau_{ik}}} \right] + \bar{W}_{W_y}(H);$$

$$\bar{W}_{z\Sigma} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{N_k} \frac{\bar{\Gamma}_{ik}}{2\pi} \frac{\bar{y} - \bar{y}_{ik}}{\bar{R}_{ik}^2} \left[1 - e^{-\frac{\text{Re}_{ik}^+ \bar{R}_{ik}^2}{4\tau_{ik}}} \right] + \bar{W}_{W_z}(H).$$

Таким образом, в предлагаемой методике расчёта характеристик дальнего спутного следа на высотах менее 500 м учитывается градиент скорости ветра по высоте с учётом шероховатости подстилающего слоя [3].

В расчёте аэродинамических характеристик ЛА влияние плоскости раздела сред достаточно надёжно моделируется путем введения зеркально отображенной относительно поверхности раздела сред вихревой системы ЛА [4, 5].

Такой же принцип используется для учёта влияния плоскости раздела сред на движение спутного следа. Влияние "экрана" в соответствии с [1] определяется посредством выполнения дополнительных граничных условий непротекания поверхности раздела с введением зеркально отображенной вихревой системы. На поверхности раздела сред нормальные составляющие скоростей принимают нулевые значения. Математические выражения по расчёту движения спутного следа в пространстве сохраняют свой вид при учёте "экрана", однако область значений переменной i расширяется, то есть $i = 1, 2k$.

Выводы

1. При математическом исследовании влияния внешних возмущений на формирование, развитие и время "жизни" вихревого следа пролетевшего летательного аппарата, состояние атмосферы удобно оценивать с помощью числа Ричардсона.

2. Предложенная методика позволяет учитывать воздействие внешних возмущений на характеристики вихревого следа в его математической модели в целях получения максимально приближенных к действительности данных, необходимых для определения опасных зон воздействия вихревого следа на вошедший в них летательный аппарат.

Литература

1. *Белоцерковский С.М., Лифанов И.К.* Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М.: Наука, 1985.
2. *Филатов Г.А., Пуминова Г.С., Сельвестров П.А.* Безопасность полётов в возмущённой атмосфере. М.: Транспорт, 1992.
3. *Желанников А.И.* В спутном вихре // Гражданская авиация. 1990. № 2. С. 8-14.
4. *Ахманов С.А., Косовский Л.А., Погосов Г.А.* Доплеровские инфракрасные лазерные системы для дистанционного измерения ветровых потоков // Известия АН СССР. 1991. Т. 55. № 2. С. 35-42.
5. *Белоцерковский С.М., Дворак А.В.* Общие свойства нелинейных задач гидродинамики с жидкими границами // Труды ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского. 1983. Вып. 1311. С. 29-37.