

## **Теоретические исследования процессов распыления химических или биологически активных компонентов в целях защиты окружающей среды с использованием БПЛА**

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

### **Введение**

Беспилотные авиационные комплексы (БпАК), имеющие в своем составе беспилотные летательные аппараты (БПЛА), широко применяют для мониторинга окружающей среды [1, 2]. Кроме экологических исследований, связанных с мониторингом, БпАК могут выполнять и другие функции, связанные с защитой окружающей среды. Например, это могут быть работы по транспортировке грузов в труднодоступные места или распыление химических или биологически активных компонентов (таблица).

Перечень экологических задач, которые могут быть решены путем транспортировки грузов в труднодоступные места или распыления химических или биологически активных компонентов с помощью БпАК

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 путем распыления биологических деструкторов
Защита сельскохозяйственных и лесных угодий биологическими средствами	Эффективная биологическая защита растений от вредных насекомых методом доставки и выпуска на сельскохозяйственные и лесные угодья трихограммы – мелкого насекомого, которое паразитирует в яйцах 215 видов насекомых. Она охотно поселяется в яйцах вредных видов совок, кукурузного и лугового мотыльков и других чешуекрылых
Получение информации о загрязнении поверхностных вод	Получение достоверной информации о загрязнении поверхностных вод путем размещения биоиндикаторов на загрязненных участках и снятия информации о степени их загрязнения

Например, при защите сельскохозяйственных и лесных угодий биологическими средствами большое значение имеет способ внесения

трихограммы: ручной, механизированный (наземный) и авиационный – с помощью малой авиации или БПЛА. Все они имеют право на жизнь и, соответственно, свои преимущества и недостатки. Например, при использовании ручного, наиболее трудоемкого, способа можно подкармливать возрожденного паразита медом, сахарным сиропом и увеличить как продолжительность его жизни, так и плодовитость на 30...40%. Механизированный и авиационный способы применяют для внесения трихограммы за сутки до ее полета. И здесь очень важно, чтобы этот срок был наименьшим, так как природные энтомофаги с удовольствием поедают куколок паразита (иногда до 40% от внесенного количества).

Преимущества внесения трихограммы при использовании БПЛА:

- низкая стоимость (20 грн/га);
- высокая точность внесения;
- сохранение до 20% урожая;
- экологически чистое уничтожение вредителей;
- эффективность против скрытых вредителей;
- отсутствие риска для жизни людей (пилотов).

Как правило, препараты для очистки водной поверхности от разливов нефти и нефтепродуктов, защиты сельскохозяйственных и лесных угодий биологическими средствами вносятся БПЛА либо мелкими каплями, либо путем рассеивания биологических объектов (яиц, насекомых и т.д.), которые также имеют незначительную массу и размеры. 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, разработанную на кафедре аэродинамики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

### **Математическая модель дальнего вихревого следа**

Математическая модель дальнего вихревого следа строится из предположения, что решена задача об обтекании ЛА, рассчитаны циркуляции и пространственное положение свободных вихрей, моделирующих вихревую пелену, сошедшую с боковых и кормовых кромок несущих поверхностей БПЛА. На расстоянии 2 – 2,5 размаха крыла от задней кромки несущей поверхности самолёта-генератора спутного следа вихревая пелена рассекается плоскостью  $S$ , перпендикулярной оси  $Ox$ . Через точки пересечения вихревых нитей пелены и плоскости  $S$  пропускаются прямые вихревые нити, уходящие в  $\pm$  бесконечность и имеющие те же циркуляции, что и криволинейные вихревые нити в соответствующих точках, полученные из решения задачи о ближнем следе (первый этап расчёта).

Такой подход позволяет перейти к решению нестационарной нелинейной задачи для двумерного течения, что даёт возможность рассчитать характеристики дальнего спутного следа. Решив задачу для одного сечения и имея связь безразмерного времени  $\tau$  со скоростью полёта ЛА и его геометрическими характеристиками, результаты расчёта можно использовать во всей рассматриваемой области дальнего спутного следа.

В задаче считаются заданными:

- координаты свободных вихрей, сошедшие с  $k$ -го ЛА  $y_{ik}(t_0)$ ,  $z_{ik}(t_0)$  (рис.1);

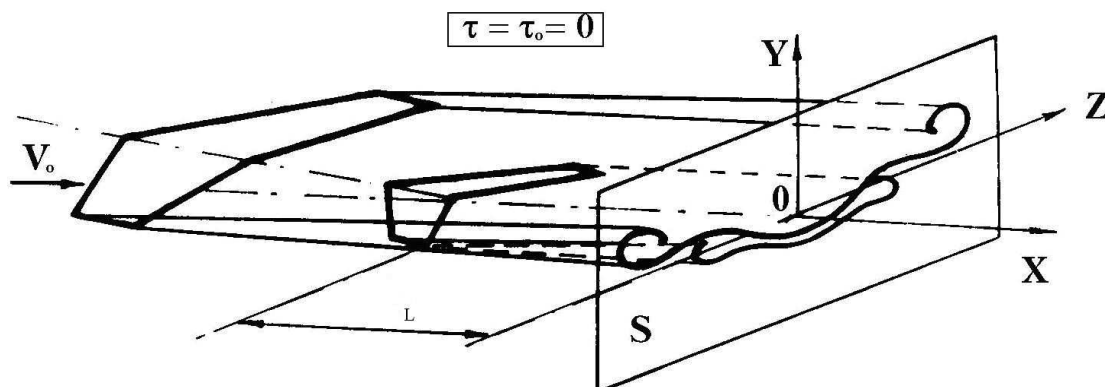


Рис. 1. К определению координат свободных вихрей дальнего спутного следа

- циркуляции свободных вихрей  $\Gamma_{ik}(t_0)$ .

При решении необходимо учитывать следующие условия:

- непротекание поверхности раздела сред;
- движение вихрей в плоскости  $S$  по линиям тока;
- задачу решают на основе теоремы Стокса.

Требуется определить:

- 1) положение свободных вихрей БПЛА;
- 2) изменение интенсивности всех свободных вихрей с течением времени на основе учета диффузии;
- 3) движение в пространстве зон, опасных для последующих БПЛА;
- 4) турбулентные характеристики спутных следов.
- 5) поле скоростей в рассматриваемой плоскости.

#### Методика расчёта

Решение задачи, сформулированной выше, обеспечивается использованием уравнения Гельмгольца, где движение системы таких вихрей в идеальной несжимаемой жидкости описывается уравнением

$$\frac{d\vec{\Omega}}{dt} = (\vec{\Omega}\vec{\nabla})\vec{W}, \quad \vec{\nabla} = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $\vec{\Omega}$  и  $\vec{W}$  – соответственно векторы угловой и линейной скоростей движения жидкости.

В идеальной жидкости, как известно, вихревые линии движутся вместе с жидкими частицами, а интенсивность вихревых трубок постоянна во времени.

Для вязкой несжимаемой жидкости выражение (1) имеет вид:

$$\frac{d\vec{\Omega}}{dt} = (\vec{\Omega}\vec{\nabla})\vec{W} + \nu \nabla^2 \vec{\Omega}, \quad (2)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  
 $\nabla^2$  – оператор Лапласа.

Для плоского случая выражение (2) записывают как

$$\frac{\partial \Omega_x}{\partial t} + W_y \frac{\partial \Omega_x}{\partial y} + W_z \frac{\partial \Omega_x}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 \Omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Omega_x}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

Уравнение (3) описывает процесс затухания прямолинейного вихря бесконечного размаха в вязкой несжимаемой жидкости.

Если в начальный момент времени  $t_0=0$  вихрь, имеющий циркуляцию  $\Gamma_{+i}$ , находится в точке с координатами  $y_i, z_i$  и расположен параллельно оси  $Ox$ , то в соответствии с решением уравнения (3) для произвольной точки в плоскости  $yOz$  с координатами  $y$  и  $z$  имеем

$$\Omega_{x(i)}(y, z, t) = \frac{\Gamma_{+i}}{8\pi\nu t} e^{-\frac{(y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}{4\nu t}}. \quad (4)$$

На основании теоремы Стокса с учетом начального условия

$$\Gamma_{+i}(y, z, 0) = \Gamma_{+i} = const \quad (5)$$

выражение для циркуляции, определяемой в точке с координатами  $y, z$ , в произвольный момент времени  $t$  имеет вид:

$$\Gamma_{+i}(y, z, t) = \Gamma_{+i} \left[ 1 - e^{-\frac{(y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}{4\nu t}} \right]. \quad (6)$$

Проекции вектора скорости, индуцируемой этим вихрем в данный момент времени в точке с координатами  $y, z$ , определяются выражениями:

$$W_{y(i)} = \frac{\Gamma_{+i}}{2\pi} \frac{z - z_i}{(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \left[ 1 - e^{-\frac{(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}{4\nu t}} \right],$$

$$W_{z(i)} = \frac{\Gamma_{+i}}{2\pi} \frac{y - y_i}{(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \left[ 1 - e^{-\frac{(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}{4\nu t}} \right]. \quad (7)$$

Поле скоростей, описываемое выражениями (7), удовлетворяет уравнению движения вихрей (3) и уравнению неразрывности плоского течения несжимаемой жидкости, которое для данного случая записывают как:

$$\frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

В рассматриваемой системе количество вихрей фиксировано, а время их "существования" (отсчитываемое от момента времени  $t_0$ , принятого за исходный) является общим для всех вихрей и равным  $\Delta t = t - t_0$ , где  $t$  – текущий момент времени. Если  $t_0$  принято равным нулю ( $t_0 = 0$ ), то время "существования" каждого из вихрей равно  $t$ .

Суммарная завихренность среды и составляющие суммарной скорости движения частиц в произвольной точке  $M_j$  плоскости  $yOz$ , в том числе и в точках нахождения вихрей  $M_i$ , в конкретный рассматриваемый момент времени будут соответственно равны:

$$\Omega_x = \sum_{i=1}^m \Omega_{x(i)}, \quad W_y = \sum_{i=1}^m W_{y(i)}, \quad W_z = \sum_{i=1}^m W_{z(i)} \quad (9)$$

Суммарное поле скоростей, как и поле скоростей одиночного вихря (7), удовлетворяет и уравнению неразрывности плоского течения несжимаемой жидкости (8), и уравнению движения вихрей (3).

Таким образом, получены основные выражения для нахождения пространственного положения дальнего спутного следа с течением времени [3 – 5], что дает возможность определить параметры облака из вносимых с помощью БПЛА компонентов в целях защиты окружающей среды.

На рис. 2 показан пример расчёта ближнего спутного следа, сгенерированного БПЛА, соответствующий режиму обтекания  $V_\infty = 100 \text{ км/ч}$ ,  $\alpha = 6^\circ$ .

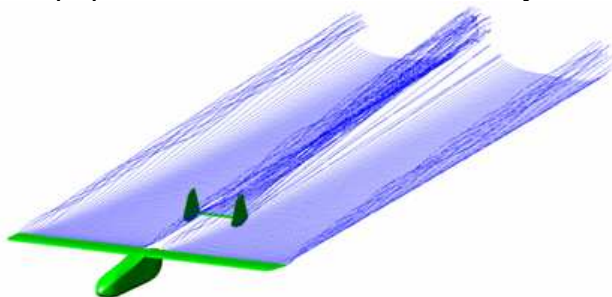


Рис. 2. Пример расчета ближнего спутного следа

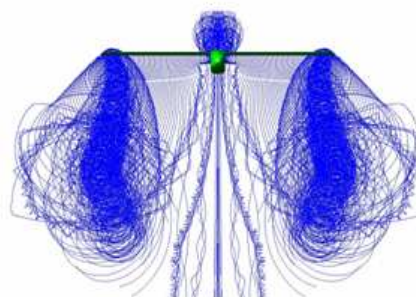


Рис. 3. Пример расчета дальнего вихревого следа

На рис. 3 изображено пространственное положение дальнего вихревого следа, рассчитанного до  $X/l = 180$ . На рис. 4, 5 показаны векторные поля

возмущённых скоростей для  $X/l = 2.5$  и  $X/l = 180$  соответственно, где  $X$  – удаление от самолёта - генератора вихревого следа,  $l$  – размах крыла самолёта - генератора.

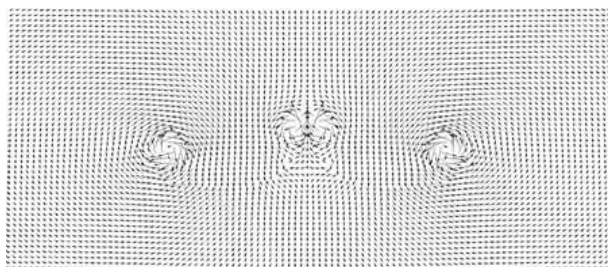


Рис. 4. Векторное поле возмущённых скоростей для  $X/l = 2.5$

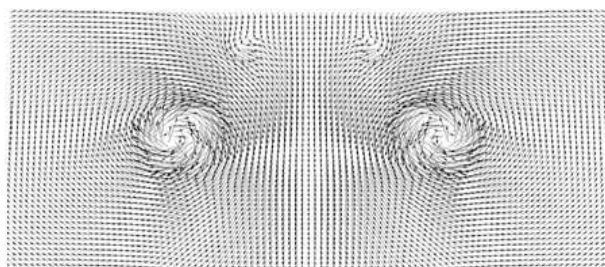


Рис. 5. Векторное поле возмущённых скоростей для  $X/l = 180$

На рис. 6, 7 изображены линии равных возмущённых скоростей, соответствующие моментам времени рис. 4 и 5 соответственно.

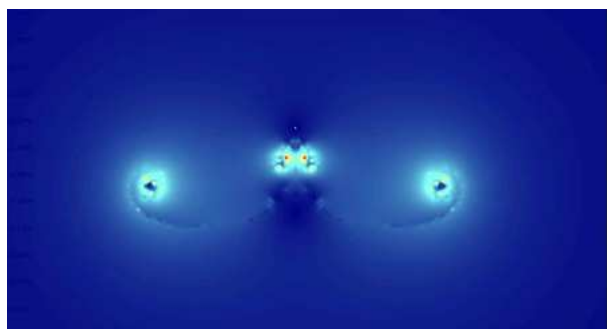


Рис. 6. Линии равных возмущённых скоростей, соответствующие моменту времени рис. 4

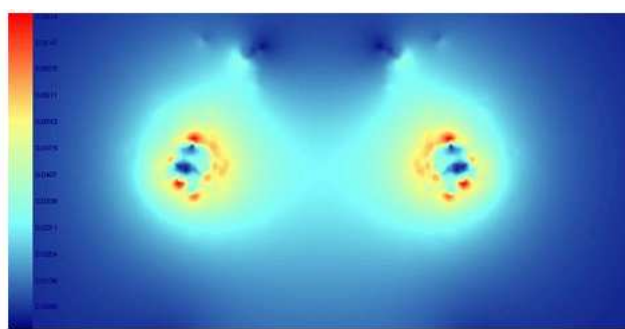


Рис. 7. Линии равных возмущённых скоростей, соответствующие моменту времени рис. 5

### Выводы

1. Для решения задачи создания облака из вносимых компонентов и его дальнейшего осаднения необходимо теоретически решить задачу об образовании и поведении дальнего спутного следа, генерируемого БПЛА в процессе полета.
2. Математическая модель дальнего вихревого следа строится из предположения, что решена задача об обтекании БПЛА, рассчитаны циркуляции и пространственное положение свободных вихрей, моделирующих вихревую пелену, сошедшую с боковых и кормовых кромок несущих поверхностей БПЛА.
3. Полученные основные выражения для нахождения пространственного положения дальнего спутного следа в зависимости от времени наблюдения дают возможность определить параметры облака из вносимых с помощью БПЛА компонентов в целях защиты окружающей среды.

### Список литературы

1. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов: справ. пособие [Текст] А.Г. Гребеников, А.К. Мялица, В.В. Парфенюк и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2008. – 377 с.
2. UAV.ru — Беспилотная авиация, www.uav.ru, «Гражданские перспективы беспилотников» [Электронный ресурс] Владимир Карнозов (спецвыпуск Milex — ISSE 2011), изд. ООО Информационно-аналитический центр «Новые технологии»
3. Авиация. – М.: Большая российская энциклопедия, 1994.
4. Нелинейная теория крыла и её приложения [Текст] Т.О. Аубакиров, С.М. Белоцерковский, А.И. Желанников, М.И. Ништ. – Алматы: «Гылым», 1997.
5. Белоцерковский С.М. Численный эксперимент в прикладной аэрогидродинамике [Текст] / С.М. Белоцерковский. – М.: Кибернетика, 1986.

**Рецензент:** д. т. н., проф., зав. каф. В. Н. Кобрин, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 11.12.2013

## Теоретичні дослідження процесів розпилення хімічних або біологічно активних компонентів в цілях захисту навколишнього середовища з використанням БПЛА

Запропоновано метод дослідження процесів розпилення хімічних або біологічно активних компонентів в цілях захисту навколишнього середовища. Розпорошення компонентів, яке виконують безпілотними літальними апаратами, теоретично аналізують методом дисперсних вихорів.

**Ключові слова:** захист навколишнього середовища, розпилення, безпілотний літальний апарат, метод дискретних вихорів.

## Theoretical studies of the atomization processes for chemical or biologically active components in order to protect the environment with the use of PAC

The analysis method of atomization processes for chemical or biologically active components in order to protect the environment was proposed. Atomization of components runs by pilotless aircrafts and theoretically analyzed by the method of discrete vortices.

**Keywords:** environmental protection, atomization, pilotless aircraft, method of discrete vortices.