

УДК 532.5: 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-49-59

## ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ВЛИЯНИЯ ВИХРЕВОГО СЛЕДА ЛЕГКИХ БЕСПИЛОТНЫХ МУЛЬТИКОПТЕРОВ

В.П. АСОВСКИЙ<sup>1</sup>, А.С. КУЗЬМЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственная компания «ПАНХ», г. Краснодар, Россия

<sup>2</sup>Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

Одним из наиболее динамичных направлений развития гражданской авиации последних лет является внедрение беспилотных летательных аппаратов. Основной областью их применения является выполнение различных видов авиационных работ. Для большинства авиационных работ характерны небольшие удаления летящих беспилотных аппаратов от людей, животных, растений и объектов инфраструктуры, в связи с чем актуален вопрос о влиянии индуктивных скоростей данных аппаратов на эти объекты и отдельные процессы авиационных работ. В статье рассмотрены вопросы оценки формирования вихревого следа и описания поля индуктивных скоростей в зоне полетов легких беспилотных мультикоптеров, которые имеют наибольшее распространение и перспективы для выполнения основных авиационных работ. Исследования проводились методом числового эксперимента с использованием разработанного в среде Delphi программного пакета. Сформированный пакет обеспечивает на основании заданных параметров мультикоптера, условий и режимов его полета моделирование процесса формирования вихревого следа аппарата как совокупности взаимовлияющих П-образных комбинаций вихрей несущих винтов мультикоптера, графическую визуализацию вихревого следа, расчеты по данным следа индуктивных скоростей в зоне пролета мультикоптера с построением соответствующих векторных диаграмм, а также решение ряда сопряженных задач. В статье представлены полученные с применением пакета для принятых условий и режимов полета графические данные по пространственной конфигурации вихревого следа и распределению его индуктивных скоростей в поперечных разноудаленных от мультикоптера плоскостях на примере легкого гексакоптера типа Odonata agro, для которого близость экспериментальных и расчетных, полученных с использованием пакета, данных осадки капель при авиаопрыскивании косвенно подтверждает адекватность пакета, а также сравнительные конфигурации вихревого следа сопоставимых по полетной массе и нагрузке на несущие винты квадрокоптеров и октакоптеров. По расчетным данным в работе сформулированы отдельные общие закономерности и особенности формирования и конфигурации вихревого следа и распределений индуктивных скоростей в зоне полетов легких беспилотных мультикоптеров. Результаты статьи могут быть использованы при оценке параметров и влияния вихревого следа легких беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа на окружающие объекты и отработке рациональных конструктивных решений и режимов полета мультикоптеров при выполнении авиационных работ.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, режим полета, вихревой след, конфигурация следа, поле индуктивных скоростей.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее динамичных направлений развития мировой и отечественной гражданской авиации последних лет является активное внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что нашло свое отражение, в частности, в изменениях Воздушного кодекса РФ, регламентирующих использование таких аппаратов. Основной областью гражданского применения подавляющей части существующих и перспективных БПЛА в настоящее время является производство авиационных работ, к которым, в первую очередь, можно отнести различные виды съемочных полетов в целях мониторинга объектов, картографии и общественной безопасности, работы по локальному распределению разнообразных веществ в интересах сельского, лесного и коммунального хозяйства (авиационно-химические работы – АХР), а также оперативную точечную доставку на небольшие расстояния, как правило, малогабаритных грузов в пределах грузоподъемности БПЛА.

Как показывает анализ применимости различных видов БПЛА, наибольшие перспективы для проведения авиационных работ, за исключением съемочных полетов над объектами большой протяженности (линий электропередач, трубопроводов и т. п.), имеют аппараты вертолет-

ного типа с несколькими несущими винтами (НВ) – мультикоптеры, имеющие, как правило, от 4 (квадрокоптеры) до 8 (октокоптеры) винтов. Это обусловлено небольшими габаритами таких аппаратов, широким диапазоном скоростей полетов, включая зависание, малыми площадками для взлета и посадки, достаточно высокой массовой отдачей и рядом других факторов. Особенностью выполнения мультикоптерами характерных для них авиационных работ является высокий удельный вес полетов в непосредственной близости от людей, растений, животных и элементов инфраструктуры (от нескольких до десятков метров), в связи с чем возникает вопрос оценки влияния поля индуктивных скоростей этих БПЛА на окружающие объекты и на процессы выполняемых работ, например, АХР [1].

Теоретические и практические задачи описания и оценки влияния вихревого следа «традиционных» типов воздушных судов, включая вопросы вихревой безопасности, в настоящее время исследованы применительно в большей степени к тяжелым транспортным самолетам [2–4]) и частично к вертолетам распространенных схем [5–7], в то время как аналогичные вопросы формирования вихревого следа мультикоптеров и описания поля индуктивных скоростей в зоне их полетов практически не изучены. В настоящее время эти вопросы наиболее актуальны для легких беспилотных мультикоптеров со взлетной массой до 25 кг, составляющих подавляющее большинство таких аппаратов в России и мире, однако в ближайшей перспективе могут стать злободневными и для заявленных проектов создания и внедрения тяжелых БПЛА.

## МЕТОД И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО СЛЕДА

С целью оценки параметров формирования и влияния вихревого следа мультикоптеров методом числового эксперимента авторами на базе объектно-ориентированной среды программирования Delphi с использованием отработанных ранее подходов, моделей и алгоритмов [8] был разработан и апробирован расчетно-программный пакет COPTER. Этот пакет обеспечивает на основании исходных данных параметров БПЛА, условий и режимов его полета реализацию итерационной процедуры расчета интенсивности (циркуляции) вихрей НВ аппарата, построения и визуализации конфигурации вихревого следа мультикоптера с учетом взаимодействия между собой всех его вихрей и их диффузии в пространстве, проведение расчетов величин составляющих индуктивных скоростей в произвольно заданных точках зоны пролета мультикоптера и построение соответствующих векторных диаграмм, а также решение специальных задач, связанных с полем индуктивных скоростей, в частности, движения в нем выпущенных с БПЛА капель рабочей жидкости при авиационном опрыскивании.

К содержательным особенностям сформированного в работе пакета можно отнести:

- использование в качестве базового элемента вихревого следа мультикоптера для каждого НВ П-образной комбинации присоединенного вихря, расположенного на диске НВ нормально набегающему потоку, и двух разнонаправленных свободных вихрей, смещающихся при движении мультикоптера по потоку с учетом взаимодействия их вихревых элементов со всеми остальными источниками аэродинамических возмущений, включая фиктивные;

- индуктивные скорости от элементов вихревого следа рассчитывались с применением векторного выражения Био – Савара для определенного из формулы Н.Е. Жуковского значения циркуляции с учетом экспериментально выявленного «поджатия» размаха присоединенного вихря НВ [9] и диффузии свободных вихрей в атмосфере [2, 3];

- учет на начальном этапе распространения свободных вихрей П-образных комбинаций воздействия компактно расположенных в центре мультикоптера элементов конструкции посредством введения в расчетную схему пространственного диполя [8], параметры которого определялись по скорости набегающего потока и геометрическим данным мультикоптера, и скошенных цилиндров индуктивных скоростей НВ [5, 6], геометрия и распределение скоростей которых находились на основании скорости полета мультикоптера и средних по диску его винтов индуктивных скоростей, принимаемых с учетом [5, 6] равными

$$U_v = \frac{p_{\text{НВ}} \cdot g}{\rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{п}}} \leq U_o = \sqrt{\frac{p_{\text{НВ}} \cdot g}{2\rho_{\text{в}}}}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где  $U_o$  – средняя по диску НВ индуктивная скорость на режиме висения;  $p_{\text{НВ}} = M_{\text{п}} / N_{\text{НВ}} \cdot S_{\text{НВ}}$  – нагрузка на одиночный НВ мультикоптера,  $\text{кг/м}^2$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха в условиях полета,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_{\text{п}}$  – скорость полета мультикоптера,  $\text{м/с}$ ;  $M_{\text{п}}$ ,  $N_{\text{НВ}}$  – полетная масса (кг) и количество НВ мультикоптера;  $S_{\text{НВ}} = \pi \cdot D_{\text{НВ}}^2 / 4$  – ометаемая НВ площадь,  $\text{м}^2$ ;  $D_{\text{НВ}}$  – диаметр одиночного НВ мультикоптера, м. При этом в качестве типового распределения скоростей по радиусу скошенного цилиндра с учетом его текущего диаметра и средних по сечению скоростей использовалось осредненное по экспериментальным данным замеров скоростей под НВ с характерными для мультикоптеров двухлопастными винтами постоянного шага выражение

$$K_{\text{UR}} = U_{\text{YR}} / U_{\text{Y0}} = -7,44 \cdot \bar{r}^2 + 8,11 \cdot \bar{r} - 0,66, \quad (2)$$

в котором  $U_{\text{YR}}$  и  $U_{\text{Y0}}$  – соответственно локальная (на приведенном радиусе  $\bar{r} = r/r_Y \leq 1$ ) и средняя по сечению цилиндра индуктивная скорость на удалении  $Y$  от плоскости НВ, введенные в расчетную схему формирования вихревого следа мультикоптера в соответствии с правилом Прандля «зеркальных» источников аэродинамических возмущений соответствующей интенсивности, моделирующих экранный эффект на малых высотах полета.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЛЕДА

На рис. 1 для примера использования разработанного пакета COPTER представлен внешний вид (а) и реализованная в пакете расчетная схема (б) гексакоптера Odonata agro, который использовался в процессе апробации программного пакета с учетом наличия по нему отдельных экспериментальных данных по выполнению полетов на АХР [10].

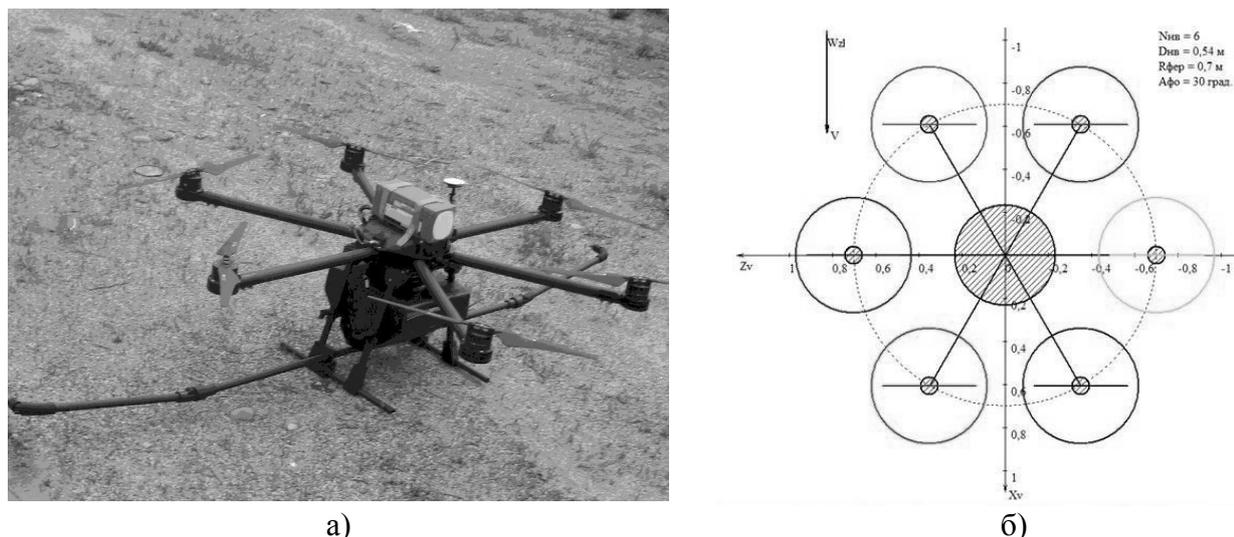
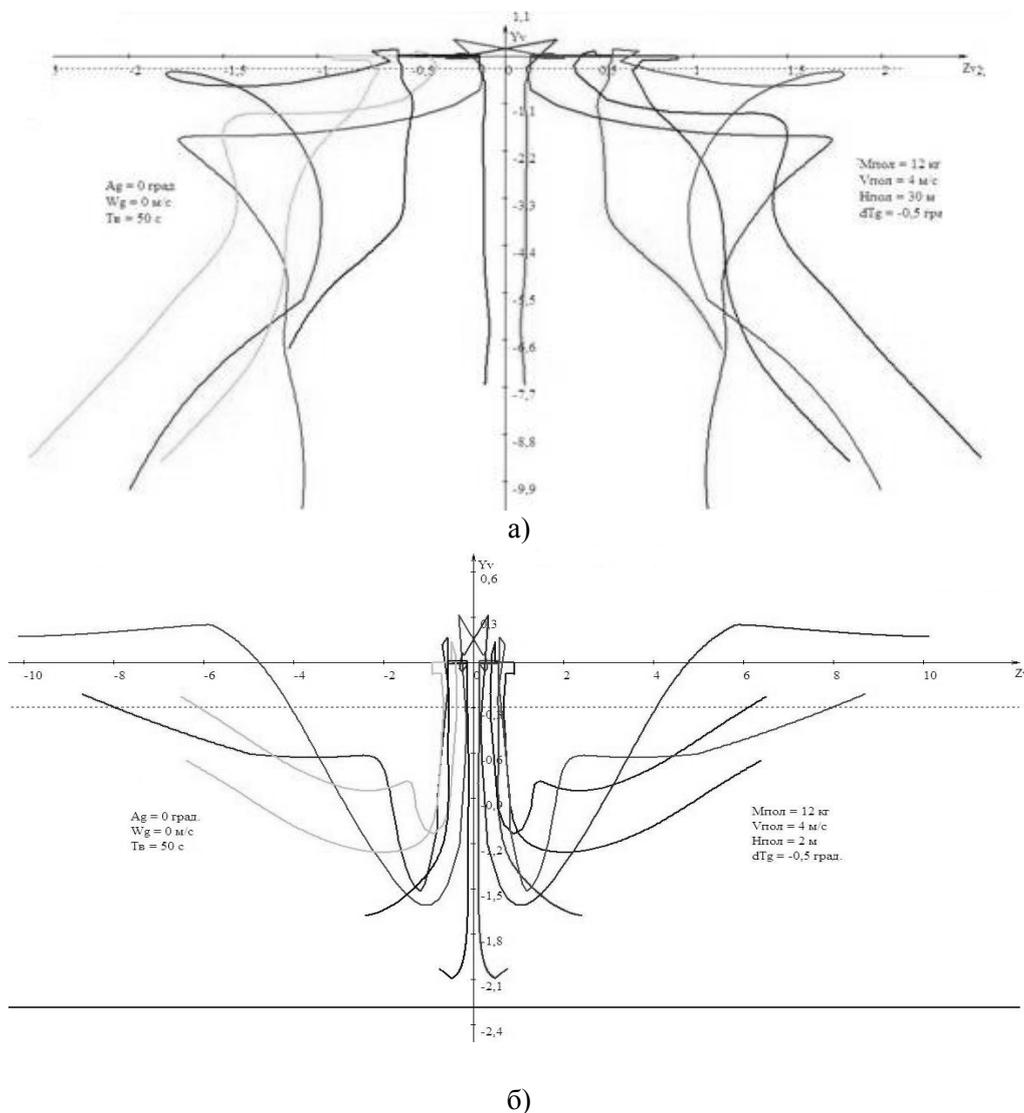


Рис. 1. Внешний вид (а) и расчетная схема (б) гексакоптера Odonata agro  
Fig. 1. Exterior view (a) and the design diagram (b) of Odonata agro hexacopter

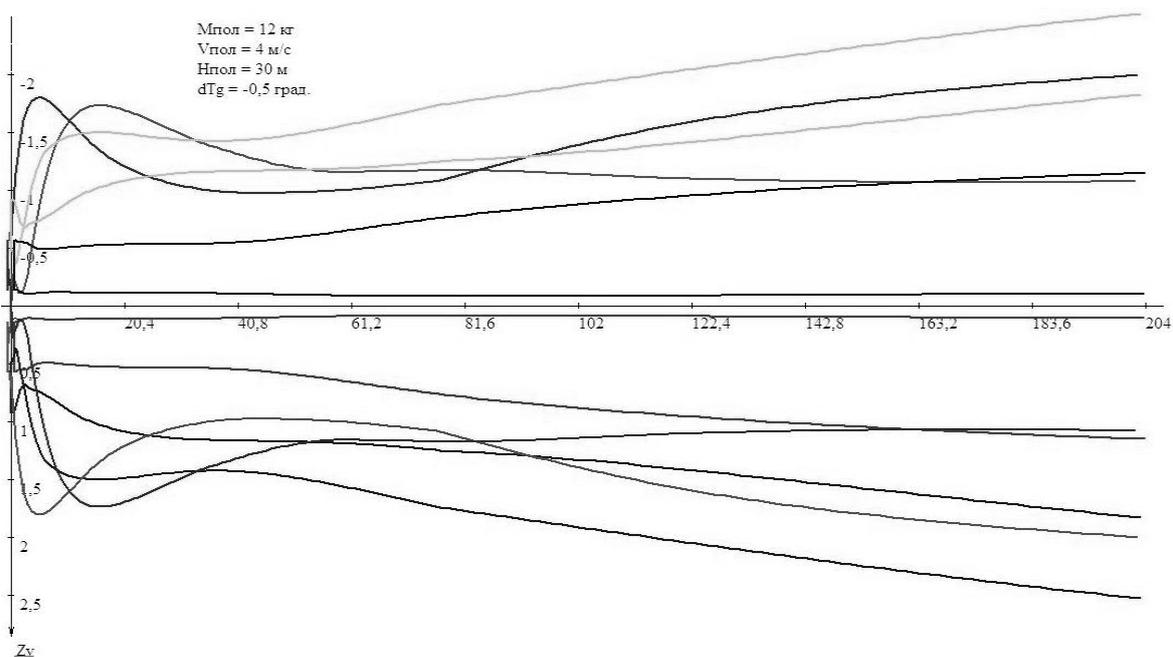
На рис. 2 и 3 для этого мультикоптера показаны расчетные конфигурации вихревых следов (с монитора компьютера при их визуализации в работе пакета), соответственно, для вида спереди и сверху при выполнении гексакоптером с  $M_{\text{п}} = 12 \text{ кг}$  горизонтального

полета с установившейся скоростью 4 м/с на высотах 30 м (а) и 2 м (б) в условиях проведения экспериментов (температура воздуха 22 °С, давление 755 мм рт. ст., влажность 70 %, слабая неустойчивая стратификация, отсутствие бокового ветра) при ориентации БПЛА согласно рис. 1, а).

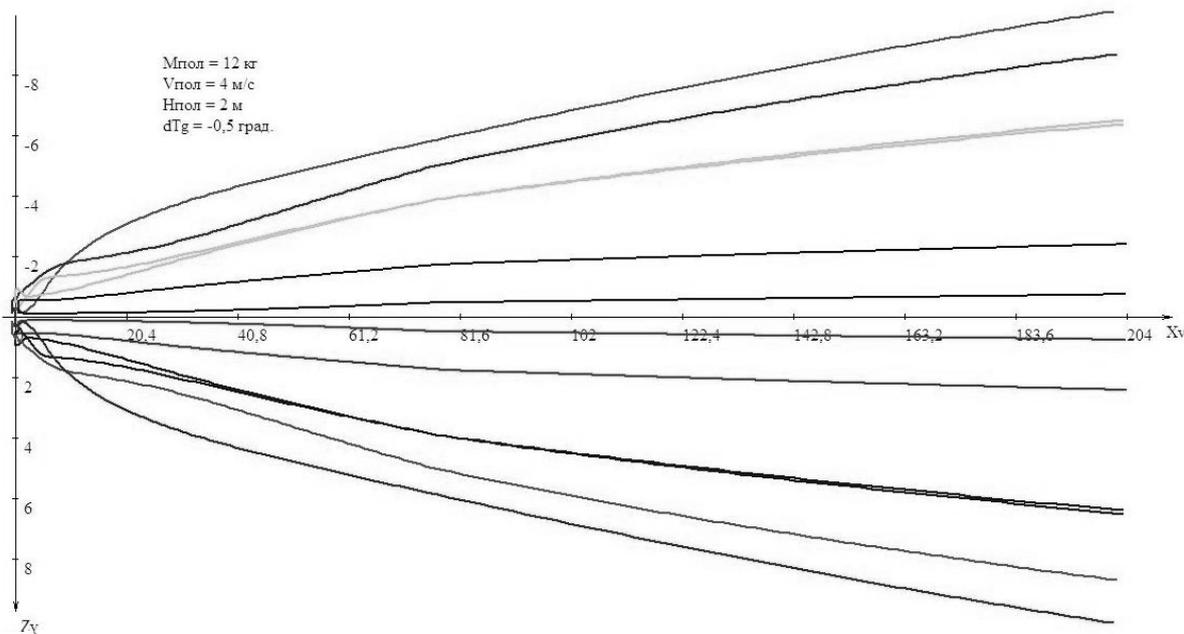


**Рис. 2.** Расчетная конфигурация вихревого следа (вид спереди) гексакоптера *Odonata agro* с полетной массой 12 кг при скорости полета 4 м/с на высоте 30 м (а) и 2 м (б)  
**Fig. 2.** Computation configuration of a vortex trace (front view) of *Odonata agro* hexacopter with flight weight of 12 kg at a flight speed of 4 m/s and at a height of 30 m (a) and 2 m (b)

На рисунках видно, что на начальном этапе формирования вихревого следа наблюдается сильное взаимодействие близко расположенных П-образных вихревых комбинаций НВ с интенсивным смещением вихрей в поперечных плоскостях, которое уменьшается по мере удаления свободных вихрей от мультикоптера ввиду диффузии вихрей и увеличения расстояний между ними. Примечательно, что при всей сложности взаимовлияния большого количества свободных вихрей в следе аппарата последние независимо от режима полета на некотором удалении за ним (~3÷5 с полета) образуют вдоль линии пролета зоны достаточно компактного расположения практически продольных вихрей, что в целом характерно для любых типов летательных аппаратов [2–8], и воспринимаются как два мощных «концевых» вихря.



а)



б)

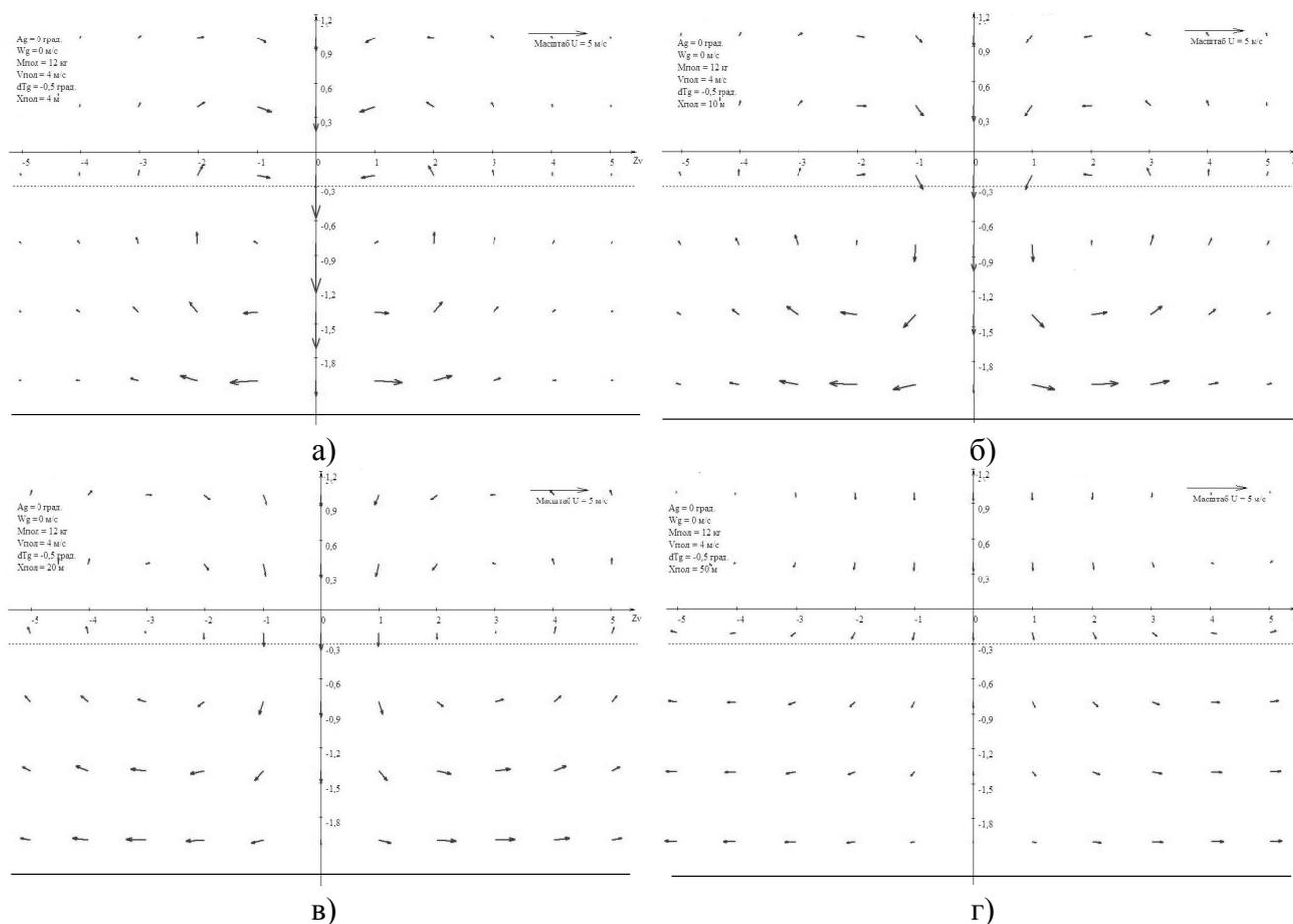
**Рис. 3.** Расчетная конфигурация вихревого следа (вид сверху) гексакоптера Odonata agro с полетной массой 12 кг при скорости полета 4 м/с на высоте 30 м (а) и 2 м (б)

**Fig. 3.** Computation configuration of a vortex trace (top view) of Odonata agro hexacopter with flight weight of 12 kg at a flight speed of 4 m/s and at a height of 30 m (a) and 2 m (b)

Особую важность для формирования вихревого следа мультикоптера имеет высота полета и влияние экранного эффекта. Влияние экрана, как видно на рис. 3, связано с одной стороны, с «растягиванием» вихрей от линии пролета на несколько габаритов БПЛА и, с другой – с «отскоком» вихрей от экрана, что не характерно для полетов на большой высоте, когда вихри беспрепятственно «опускаются» вниз при незначительном смещении в поперечном направлении.

Результаты расчетов пакетом индуктивных скоростей в зоне пролета мультикоптера по предварительно определенным показателям его вихревого следа иллюстрирует рис. 4, на котором для гексакоптера Odonata agro при  $V_H = 4$  м/с на высоте полета 2 м в одном масштабе пред-

ставлены векторные диаграммы индуктивных скоростей в поперечных к линии пролета плоскостях, находящихся на удалении 4 м (а), 10 м (б), 20 м (в) и 50 м (г) за БПЛА.



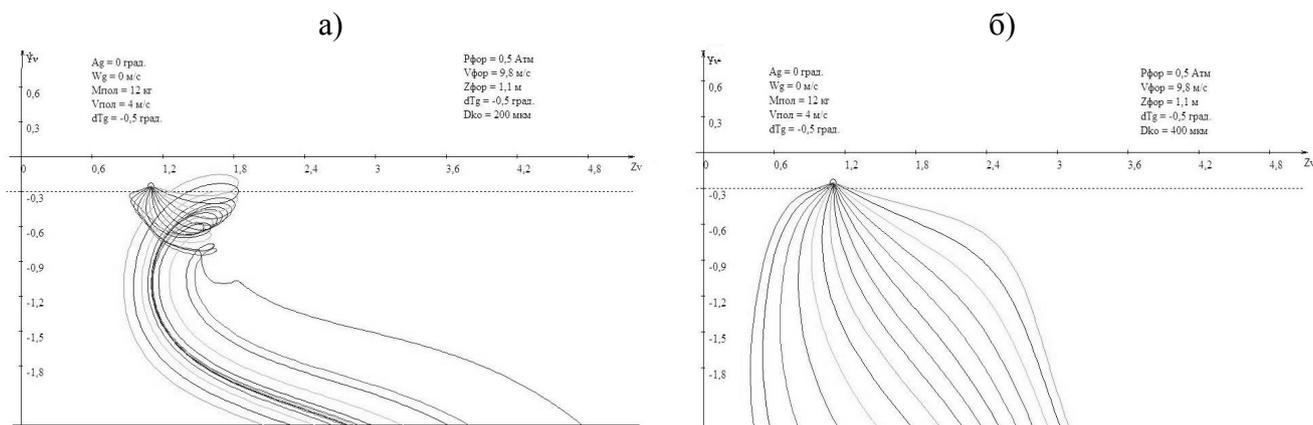
**Рис. 4.** Поля индуктивных скоростей в поперечных плоскостях на удалении 4 м (а), 10 м (б), 20 м (в) и 50 м (г) за гексакоптером *Odonata agro* при скорости 4 м/с и высоте его полета 2 м  
**Fig. 4.** Induced velocity fields in the cross planes at a distance of 4 m (a), 10 m (b), 20 m (v) and 50 m (g) behind *Odonata agro* hexacopter at a speed of 4 m/s and at a height 2 m

Особенностью представленных полей индуктивных скоростей является наличие на них двух характерных центров вращения, соответствующих отмеченным ранее «концевым» вихрям, положение и интенсивность воздействия которых в пространстве изменяется по времени (удалению от БПЛА). Характерен также эффект растекания в стороны от линии пролета мультикоптера и существенное ускорение индуктивного потока в непосредственной близости от экрана, где может достигаться локальный максимум индуктивных скоростей (в зоне горизонтальной проекции на экран следа близкорасположенного свободного вихря).

Расчеты показывают, что наивысший уровень индуктивных скоростей в следе мультикоптера отмечается в непосредственной близости с ним (в пределах габарита аппарата), при этом локальные максимальные значения этих скоростей не превышают утроенной величины средней по диску индуктивной скорости  $U_V$  в соответствии с (1). В свою очередь наибольшие значения индуктивных скоростей за мультикоптером на больших удалениях, в том числе у экрана, в большинстве своем не превышают величины  $U_V$  и быстро уменьшаются по мере удаления от аппарата в продольном и особенно поперечном направлениях.

Реализация программным пакетом процедур определения индуктивных скоростей в зоне выполнения полета мультикоптера позволяет проводить анализ их предельных значений с точки зрения влияния индуктивного следа на окружающие объекты и решать прикладные

задачи, связанные с использованием в качестве исходных данных индуктивных скоростей. В этой связи на рис. 5 для примера показаны расчетные траектории движения капель с начальным диаметром 200 мкм (а) и 400 мкм (б), выпущенных из ориентированного вниз концевго дефлекторного распылителя типа ASJ с базовым углом раскрытия факела  $140^\circ$  при давлении на входе в него 0,05 Мпа, при выполнении гексакоптером *Odonata agro* опрыскивания на скорости 4 м/с и высоте полета 2 м в отмеченных ранее условиях проведения экспериментов [10].



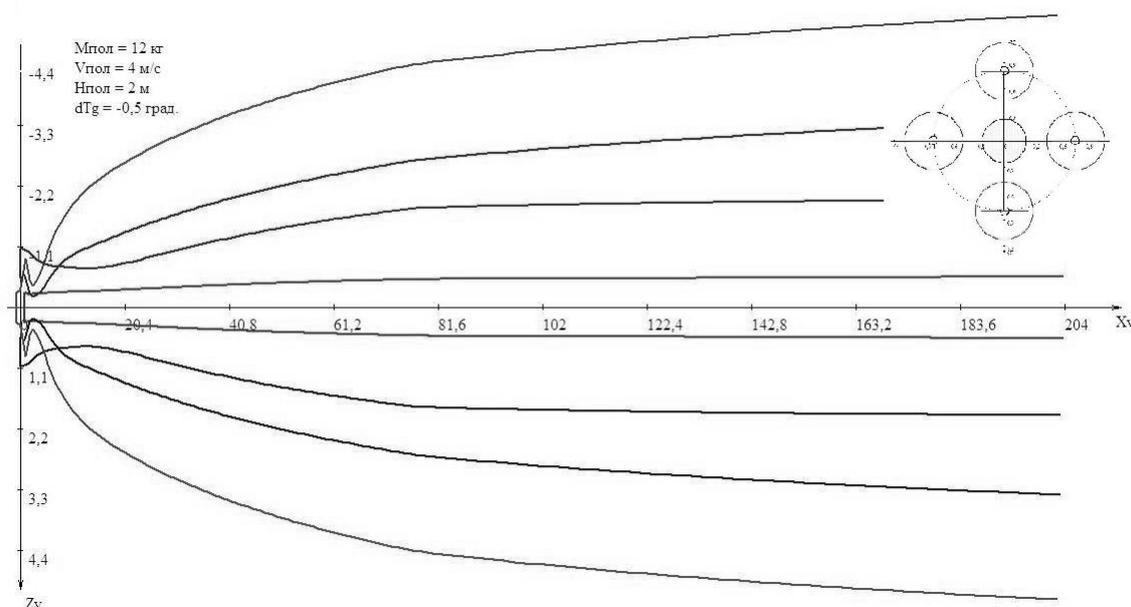
**Рис. 5.** Расчетные траектории движения капель с начальным диаметром 200 мкм (а) и 400 мкм (б), выпущенных с гексакоптера *Odonata agro* на скорости 4 м/с и высоте полета 2 м

**Fig. 5.** Computation trajectories of drops motion with an initial diameter of 200 micron (a) and 400 micron (b) launched from *Odonata agro* hexacopter at a speed of 4 m/s and at an altitude of 2 m

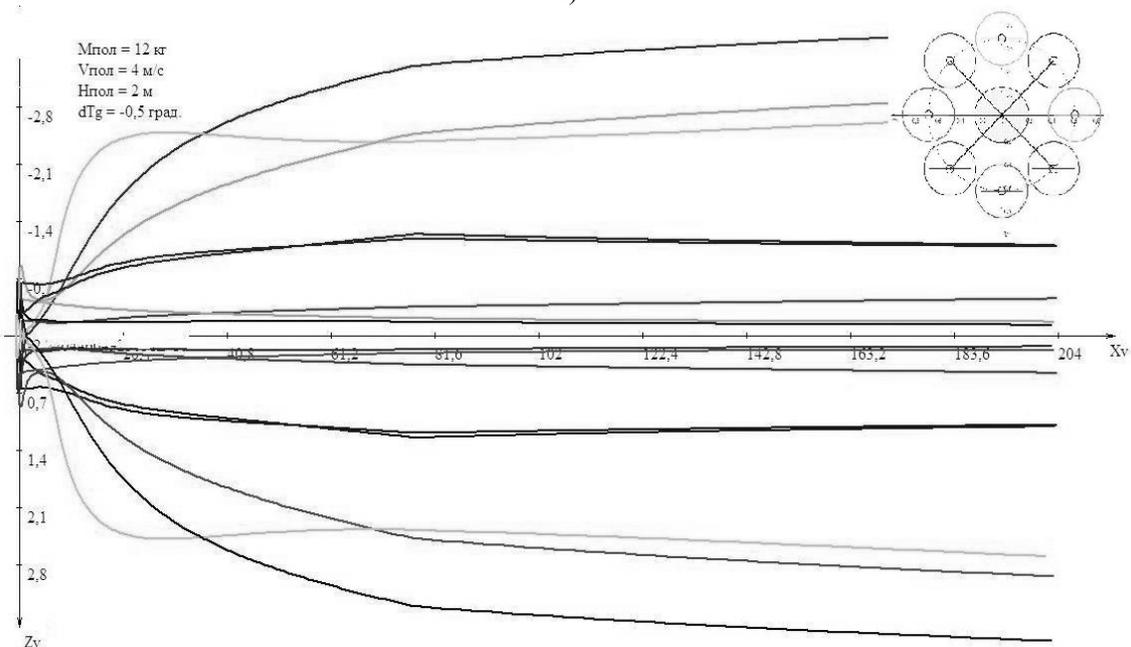
Как видно из представленных данных, для мультикоптера наблюдается качественная общность влияния индуктивного следа на движение выпущенных с БПЛА капель с «традиционными» летательными аппаратами, в частности, вовлечение в круговое движение и «подхват» капель мелких и средних фракций (до 250 мкм), выпущенных из периферийных зон, и преимущественно инерционное движение более крупных капель, с дополнительным наложением на него индуктивных скоростей в процессе осаждения [7]. Проведенный анализ траекторий движения всего спектра капель и данных, получаемых при этом эпюру осаждения для проверенных на практике режимов опрыскивания гексакоптера *Odonata agro*, подтвердил близость (отклонения  $\pm 10\%$ ) характерных для осаждения расчетных и экспериментальных данных [10], что косвенно подтверждает адекватность сформированного пакета для оценки особенностей формирования вихревого следа мультикоптера и полей индуктивных скоростей.

Для примера формирования вихревого следа за мультикоптерами с отличным от гексакоптера количеством НВ на рис. 6 показаны расчетные конфигурации следа (вид сверху) квадрокоптера ( $N_{НВ} = 4$ ) (а) и октокоптера ( $N_{НВ} = 8$ ) (б) с сопоставимыми массой ( $M_{П} = 12$  кг), нагрузкой на винт ( $p_{НВ} = 8,7$  кг/м<sup>2</sup>) и ориентацией БПЛА относительно потока при скорости и высоте полета соответственно 4 м/с и 2 м.

Сравнение данных рис. 3, б и 6 показывает, что при сопоставимых параметрах БПЛА и режима полета количество НВ не оказывает принципиального влияния на конфигурацию вихревого следа, который интенсивно формируется и «растягивается» в стороны сразу за аппаратом (первые 1÷2 с) и затем стабилизируется на удалении до 20÷25 м (5÷6 с) за ним, образуя мощные концевые и одну центральную «свертки» вихрей при некоторых отличиях в размахе системы вихрей, при этом, как показывают проведенные в работе расчеты, эта особенность проявляется для всех проверенных сочетаний параметров и режимов полета мультикоптеров.



а)



б)

**Рис. 6.** Расчетная конфигурация вихревого следа (вид сверху) квадрокоптера (а) и октакоптера (б) с массой 12 кг и нагрузкой на винты  $8,7 \text{ кг/м}^2$  при скорости полета 4 м/с на высоте 2 м  
**Fig. 6.** Computation configuration of a vortex trace (top view) of the quadcopter (a) and the octacopter (b) with a mass of 12 kg and the load on the screws of  $8,7 \text{ kg/m}^2$  at speed of 4 m/s and at a height of 2 m

Качественная общность вихревого следа сопоставимых мультикоптеров наиболее распространенной радиально-лучевой схемы (рис. 1, б) с различным количеством НВ определяет, как показывают расчеты, аналогичную близость и распределения индуктивных скоростей БПЛА по мере удаления от него, при том, что, как и в ранее рассмотренном случае (рис. 4), их максимальные значения не превышают  $U_v$  по (1), а общий их уровень снижается при росте  $N_{\text{НВ}}$  ввиду относительного уменьшения при этом величин начальной циркуляции для типовых соотношений заданной схемы мультикоптера и зафиксированных параметрах  $M_{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{НВ}}$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам проведенных в работе расчетных исследований с варьированием параметров легких беспилотных мультикоптеров, режимов и условий выполнения ими полетов можно выделить следующие общие положения:

– формирование и воздействие вихревого следа указанных БПЛА на режимах установившегося горизонтального полета не имеет принципиальных качественных отличий от «традиционных» типов тяжелых пилотируемых летательных аппаратов;

– вихревой след легких мультикоптеров с типовой радиально-лучевой компоновкой НВ независимо от их количества имеет две характерные зоны: в непосредственной близости за БПЛА на удалении в пределах  $1 \div 2$  с за аппаратом, где происходит начальное формирование следа с интенсивным расхождением и «скруткой» свободных вихрей друг относительно друга, и зона «дальнего» следа с относительно устойчивыми компактно расположенными комбинациями примерно продольно ориентированных концевых вихрей, связанных с возникновением двух центров разнонаправленного вращения газовой среды за пролетающим мультикоптером;

– максимальная локальная скорость индуктивных потоков мультикоптера в непосредственной близости от него составляет  $\approx 3U_V$  и достигается в сечении скошенных цилиндров его НВ на удалении  $(1 \div 1,5)D_{НВ}$  от плоскости винтов, а в дальнем вихревом следе не превышает значения  $U_V$  в соответствии с (1) при быстром уменьшении предельных величин скоростей по мере удаления от БПЛА в продольном и особенно поперечных направлениях;

– уровень индуктивных скоростей в вихревом следе наиболее распространенных легких беспилотных мультикоптеров с массой до 25 кг и небольшой нагрузкой на винт не сопоставим с показателями «тяжелых» летательных аппаратов [3, 4] и не представляет реальной угрозы для окружающих объектов, в т. ч. для безопасности «традиционных» пилотируемых летательных аппаратов, однако нуждается в учете при отработке процессов и технологий выполнения ими на малых высотах полета отдельных авиационных работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформированный с использованием модели П-образной вихревой комбинации НВ расчетно-программный пакет позволяет оценить основные качественные и количественные особенности и закономерности формирования вихревого следа легких беспилотных мультикоптеров и распределение индуктивных скоростей в зоне выполнения его полета и может быть использован для решения прикладных задач определения значимых показателей и ограничений применения мультикоптеров, связанных воздействием этих аппаратов на окружающие объекты и реализацией процессов выполнения ими авиационных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов Т.В. БПЛА – вам взлет! // Защита и карантин растений. 2017. № 5. С. 37–39.
2. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Вихревой след самолета в турбулентной атмосфере // Труды ЦАГИ. 2006. Вып. 2667. 155 с.
3. Гиневский А.С., Желанников А.И. Вихревые следы самолетов. М.: Физматлит, 2008. 170 с.
4. Желанников А.И. К исследованию характеристик вихревого следа за самолетом А-380 на режимах взлета и посадки // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Том 19, № 6. С. 51–57.
5. Вильдгубе Л.С. Вертолеты. Расчет интегральных аэродинамических характеристик и летно-технических данных. М.: Машиностроение, 1977. 152 с.

6. Браверман А.С., Вайнгруб А.П. Динамика вертолета. Предельные режимы полета. - М.: Машиностроение, 1988. 280 с.

7. Нелинейная лопастная вихревая теория винта и ее приложения для расчета аэродинамических характеристик несущих и рулевых винтов вертолета / Ю.М. Игнаткин, П.В. Макеев, Б.С. Гревцов, А.И. Шомов // Вестник МАИ. 2009. Т. 16, № 5. С. 24–31.

8. Асовский В.П. Теория и практика авиационного распределения веществ. М.: Воздушный транспорт, 2008. 580 с.

9. Свинин А.И. Математическая модель вихревого следа за вертолетом в условиях авиационно-химических работ // Научно-технический реферативный сборник ГосНИИ ГА. 1982. № 1. С. 27–33.

10. Асовский В.П., Гусева А.А., Шарипова Н.В. Оценка показателей опрыскивания легким БПЛА // Защита и карантин растений. 2017. № 7. С. 42–45.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Асовский Валерий Павлович, доктор технических наук, ученый секретарь Научно-производственной компании «ПАНХ», asovsky@panh.ru.

Кузьменко Алла Сергеевна, аспирант, ассистент кафедры летательных аппаратов Южного федерального университета, all7212@mail.ru.

## EVALUATION OF THE FORMATION AND VORTEX TRACE INFLUENCE OF LIGHT UNMANNED MULTICOPTERS

Valery P. Asovsky<sup>1</sup>, Alla S. Kuzmenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PANH Helicopters; Krasnodar, Russia

<sup>2</sup>Southern Federal University; Taganrog, Russia

### ABSTRACT

The introduction of unmanned aerial vehicles is one of the most dynamic areas of civil aviation development over the last years. The main field of their application is the performance of different aerial works. The most part of the aerial works is characterized by a small distance of flying unmanned vehicles from humans, animals, plants and infrastructure. Thus the influence of inductive velocities of these vehicles on the objects and some processes of aerial works is the topical issue. The article considers the problems of evaluation of vortex trace formation and description of inductive velocities field within the flying area of light unmanned multicopters which are the most popular and promising for the performance of the basic aerial works. The studies have been conducted by a numerical experiment using the software package developed in Delphi. On the bases of the defined multicopter parameters, conditions and flight modes created package provides simulation of the vortex trace formation of multicopter as a set of the mutually influencing П-shaped vortices of the multicopter rotors, graphic visualization of the vortex trace and calculations according to the inductive velocities in the flight area with the construction of the vector diagrams as well as some related problems. The article presents the graphic data on the spatial configuration of vortex trace and distribution of inductive velocities in the transverse planes which are unequally distant from the multicopter; for example, light hexacopter "Odonata agro", for which the proximity of experimental and calculation data of drops sedimentation at aerial spraying, received with the use of the package, confirms indirectly the package adequacy as well as configurations of vortex trace which are comparable in flight weight and load upon rotors of quadcopters and octocopters. According to the calculated data the general regularities and features of the vortex trace formation and configuration, distributions of the inductive velocities within the flying area of the light multicopters are formulated in this paper. The results can be used at the evaluation of the parameters and the vortex trace influence of light unmanned aerial vehicles on the surrounding objects and optimization of rational structural designs and multicopter flight modes while performing aerial works.

**Key words:** unmanned aerial vehicle, multicopter, flight mode, vortex trace, trace configuration, field of inductive velocities.

## REFERENCES

1. Kornilov T.B. *BPLA – vam vzlet!* [UAV – you take-off!]. *Zaschita i karantin rastenij* [Plant Protection and Quarantine], 2017, No. 5, pp. 37–39. (in Russian)
2. Vyshinsky V.V., Sudakov G.G. *Vikhrevoi sled samoleta v turbulentsnoi atmosfere* [Vortex trail of a plane in turbulent atmosphere]. *Trudy TsAGI* [Works of TsAGI], 2006, Vol. 2667, 155 p. (in Russian)
3. Ginevsky A.S., Zhelannikov A.I. *Vikhrenye sledy samoletov* [Vortex wakes of Aircraft], Moscow, Fizmatlit, 2008, 170 p. (in Russian)
4. Zhelannikov A.I. *K issledovaniju harakteristik vikhrevoogo sleda za samoletom A-380 na rezhimakh vzleta i posadki* [To the study of wake vortex behind the Airbus-380 characteristics at take-off and landing]. *Nauchny Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2016, Vol. 19, No. 06, pp. 51–57. (in Russian)
5. Vildrgube L.S. *Vertolety. Raschet integralnykh ajerodinamicheskikh harakteristik i letno-technicheskikh dannykh* [Helicopters. Calculation of integrated aerodynamic characteristics and flight specifications]. M., Mechanical Engineering publ., 1977, 152 p. (in Russian)
6. Braverman A.S., Vaintrub A.P. *Dinamika vertoleta. Predelnye rezhimy poleta* [Dynamics of the helicopter. Limit modes of flight]. M., Mechanical Engineering publ., 1988, 280 p. (in Russian)
7. Ignatkin Yu.M., Makeev P.V., Grevtsov B.S., Shomov A.I. *Nelinejnaja lopastnaja vikhrevaja teoriya vinta i ee prilozhenija dlja rascheta ajerodinamicheskikh harakteristik nesushhih i rulevykh vintov vertoleta* [The nonlinear bladed vortex theory of the screw and its applications for calculation of aerodynamic characteristics of the bearing and steering screws of the helicopter]. *Vestnik MAI* [Herald of Moscow Aviation Institute], 2009, Vol. 16, No. 5, pp. 24–31. (in Russian)
8. Asovskiy V.P. *Teoriya i praktika aviatsionnogo raspredeleniya veshchestv* [Theory and practice of aerial crop dusting]. Moscow, *Vozdushny transport* [Air transport], 2008, 580 p. (in Russian)
9. Svinin A.I. *Matematicheskaja model vikhrevoogo sleda za vertoletom v uslovijah aviacionno-himicheskikh rabot* [Mathematical model of a vortex trace behind helicopter in the conditions of crop dusting]. *Nauchno-technicheskij referativnyj sbornik GosNII GA* [Scientific and technical abstract collection of State Civil Aviation Research Institute], 1982, No. 1, pp. 27–33. (in Russian)
10. Asovskiy V.P., Guseva A.A., Sharipova N.V. *Ocenka pokazatelej opryskivaniya legkim BPLA* [Evaluation of spraying performance by light UAV]. *Zashhita i karantin rastenij* [Plant Protection and Quarantine], 2017, No. 7, pp. 42–45. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Valerii P. Asovskii**, Doctor of Technical Sciences, Scientific Secretary of PANH Helicopters, [asovsky@panh.ru](mailto:asovsky@panh.ru).

**Alla S. Kuzmenko**, Post-Graduate Student, Assistant of the Chair of Aircraft, Southern Federal University, [all7212@mail.ru](mailto:all7212@mail.ru).

Поступила в редакцию  
Принята в печать

01.11.2017  
28.12.2017

Received  
Accepted for publication

01.11.2017  
28.12.2017