

## Оценка эффективности рассеяния лазерного излучения в следе летательного аппарата

М.А. Лобанова, А.В. Савин

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова,  
190005 Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, д. 1  
E-mails: mashula1987@mail.ru, izooandrey@inbox.ru*

На основе расчета объемного коэффициента обратного рассеяния водного аэрозоля в вихревом следе летательного аппарата (ЛА) предложена методика определения оптических свойств дисперсной фазы вдоль следа. Обоснована необходимость и сделана оценка возможности создания панорамного PIV-лидара (Particle Image Velocimetry – метод цифровой трассерной визуализации) для бортового мониторинга собственного следа ЛА.

**Ключевые слова:** рассеяние лазерного излучения в следе ЛА, мониторинг собственного вихревого следа ЛА, PIV-метод построения поля скорости

С ростом размеров самолетов и мощности двигателей проблема обеспечения вихревой безопасности полетов в современной авиации в последнее десятилетие стала одной из самых актуальных. Количество аварий исчисляется десятками из-за попадания воздушных судов в вихревые потоки [1]. Продукты сгорания авиационного топлива оказывают химическое воздействие на окружающую среду и образование высотных облаков [2]. В этой связи обнаружение и идентификация струйно-вихревых следов представляются весьма важными с точки зрения прогнозирования возможного негативного влияния вихревой обстановки на безопасность в зоне полета и экологию атмосферы.

Мониторинг вихревых следов ЛА должен осуществляться как в зоне аэропортов, так и на эшелонах с применением наземных и бортовых средств. Для наземной визуализации в России и за рубежом разрабатываются различные методы и их техническая реализация [3]. Однако при полете вдали от аэропортов необходимы бортовые системы диагностики струйно-вихревого следа, аппаратно-программные компоненты которых и принцип их взаимодействия до настоящего времени не ясны. Стоит отметить, что проблеме вихревой безопасности полетов и экологии аэропортов посвящено довольно много работ. Наиболее интересные физико-математические модели эволюции вихревых следов за ЛА разработаны в ЦАГИ (см. [2, 4, 5]).

В настоящей статье перечислены физические процессы, участвующие в формировании зондируемой среды, представленной в виде водного аэрозоля продуктов сгорания двигателей авиалайнера Ил-86, предложена методика расчета объемного коэффициента обратного рассеяния дисперсной фазы вихревого следа. Представлены оценки границ применимости PIV-метода для построения поля скорости в струйно-вихревом следе ЛА, который может лечь в основу бортового панорамного аэрозольного лидара (панорамного PIV-лидара).

### Расчет оптических характеристик струйно-вихревого следа

#### *Постановка задачи*

Известно, что выхлопные газы любых самолетов содержат в своем составе довольно большое количество водяного пара и частиц сажи, на которых при определенных пара-

метрах окружающей атмосферы конденсируется влага (гетерогенная конденсация). Взаимодействие несущей и диспергированной фаз сопровождается множеством релаксационных процессов – обменом массой, импульсом и энергией; столкновением, агломерацией и дроблением капель [5]. Таким образом, состав и поведение дисперсной примеси в струйно-вихревом следе ЛА являются результатом сложных физических превращений: нуклеации (зарождения ядер конденсации) водяного пара, роста частиц, их броуновского движения, турбулентности несущей среды, тяготения, кулоновских сил (в случае электрически заряженных капель), замерзания водного аэрозоля и появления кристалликов льда, перераспределения частиц из-за динамического и теплового взаимодействия с газовой фазой.

Изучение и описание такого множества физических процессов, происходящих в течении, требует создания физико-математических моделей различного уровня сложности. Моделированию химически реагирующих и полидисперсных турбулентных потоков посвящена обширная литература, (см. статью [4] и ссылки в ней). В [5] показано, что присутствие в следе самолета ионов и молекул кислот (в частности, серной) сильно снижает уровень давления паров воды, при котором может начаться образование капель. Также продемонстрирована возможность управления массовым спектром (оптической прозрачностью) следа. Предпринятые ранее исследования подтверждают необходимость и важность более детального изучения перечисленных выше физических процессов для лучшего понимания структуры струйно-вихревого следа и предсказания его поведения за ЛА.

В данной работе для получения оценок оптических параметров вихревого следа используется значительно более простая модель зондируемой среды. Рассматривается водный аэрозоль продуктов сгорания четырёхмоторного широкофюзеляжного пассажирского самолёта Ил-86, для которого принят логарифмически-нормальный закон распределения капель по размерам:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}rs} \exp\left[-\frac{1}{2s^2} \ln^2\left(\frac{r}{r_0}\right)\right], \quad (1)$$

где  $r_0$  - средний радиус частиц ансамбля водного аэрозоля, а  $s$  - дисперсия. В расчетах  $s = 1$ , величина  $r_0$  варьируется в диапазоне от 0,001 до 2 мкм.

Областью, представляющей интерес, является дальний след, т.к. именно он дает важную информацию о протяженности и параметрах струйно-вихревого течения за ЛА. Для Ил-86 эта зона начинается примерно с 500 м.

В качестве источника лазерного излучения взят один из наиболее широко применяемых в лидарных системах твердотельный лазер на кристаллах иттрий-алюминиевого граната с примесью неодима ( $Y_3Al_5O_{12} : Nd^{3+}$ ). Выбор длины волны  $\lambda = 0,532$  мкм (вторая гармоника) соответствует видимому диапазону, в котором наиболее ярко проявляются эффекты ослабления сигнала.

Взаимодействие лазерного излучения с аэрозольными частицами следа описывается теорией Ми в приближении однократного рассеяния на сферических каплях. Формулы теории Ми достаточно громоздки, поэтому здесь не приводятся (см. подробнее [7, 8]). Для расчетов используется алгоритм, предложенный в [9].

Ниже представлены результаты оптического расчета. На рисунке 1 показаны графики зависимостей фактора эффективности обратного рассеяния от параметра размера  $\alpha$

частицы воды (а), а также графики логарифмически-нормального распределения (б), сечения обратного рассеяния одной частицы  $\sigma_{\pi}$  и плотности объемного коэффициента обратного рассеяния  $d\beta/dr$  для среды водного аэрозоля при среднем размере капель  $r_0 = 0,09 \text{ мкм}$  в логарифмическом масштабе (в). Рисунок 1 (г) соответствует объемному коэффициенту обратного рассеяния  $\beta_{\pi}$  водного аэрозоля единичной концентрации  $n = 1 \text{ м}^{-3}$  как функции среднего размера частиц ансамбля. На графике зависимости сечения обратного рассеяния от радиуса капель в значении  $r = 0,5 \text{ мкм}$  встречаются две области: рэлеевская ( $r < 0,5 \text{ мкм}$ ) и геометрическая ( $r > 0,5 \text{ мкм}$ ), о чем свидетельствует уменьшение угла наклона кривой. В этой переходной зоне распределение плотности коэффициента рассеяния  $d\beta/dr$  имеет максимум. Это согласуется с известным положением: наилучшие в смысле рассеяния размеры частиц аэрозоля имеют порядок длины волны падающего излучения ( $2\pi r / \lambda \sim 2\pi$ ). В нашем случае оптимальный радиус капель  $r \approx 0,53 \text{ мкм}$  (см. рисунок 1 (в)).

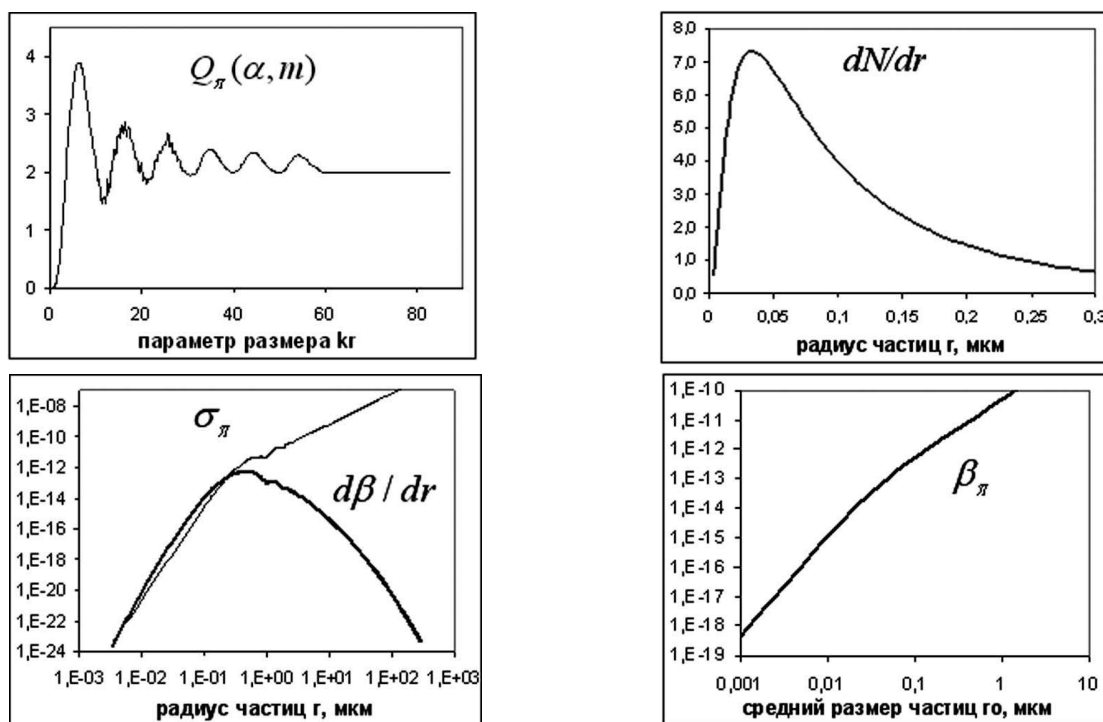
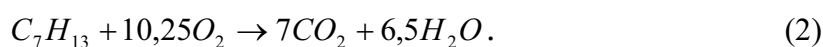


Рис. 1. Оптические характеристики частиц водного аэрозоля

### Определение концентрации водного аэрозоля в струйно-вихревом следе

Уравнение реакции сгорания топлива самолета можно записать следующим образом:



Справа в уравнении (2) стоит суммарное содержание воды в следе, как в жидком, так и в газообразном состоянии. Расход воды был определен из пропорции (3), где слева стоит отношение молярных масс воды и топлива Ил-86, а справа – их расходы:

$$\frac{117 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}{97 \frac{\text{г}}{\text{моль}}} = \frac{Q_{H_2O}}{Q_{C_7H_{13}}} = \frac{Q_{H_2O}}{\frac{11500 \text{ кг}}{3600 \text{ с}}}. \quad (3)$$

В результате имеем  $Q_{H_2O} = 3,853 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

В качестве необходимых промежуточных параметров оптического расчета были найдены полутолщина и скорость на оси вихревого следа из следующей системы уравнений с начальными условиями (4), где первое уравнение описывает закон увеличения толщины погранслоя в следе (след рассматривается как осесимметричная струя в спутном потоке воздуха), а второе является выражением закона сохранения импульса [10]:

$$\frac{d\delta}{dx} \sim \frac{|u_m(x) - u_\infty|}{|u_m(x)| + |u_\infty|} \quad \text{При } x = 0: \quad \begin{aligned} u_m &= u_0 = 686,521 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \\ \delta &= r_a = 0,89 \text{ м} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx} (\rho (u_m(x) - u_\infty)^2 \cdot \pi \delta(x)^2) = 0$$

$\delta$  – полутолщина погранслоя струи (см. рисунок 2),  $u_m(x)$  – скорость на оси струи, которая на ее начальном участке равна  $u_0 = \text{const}$ ,  $u_\infty$  – скорость окружающего потока воздуха,  $\rho$  – плотность среды в струе,  $\pi \delta(x)^2$  – площадь сечения струи,  $r_a$  – радиус среза сопла самолета.

В области дальнего следа температура и скорость рабочих газов стремятся выровняться с температурой и скоростью набегающего на самолет воздуха. Полутолщина погранслоя и скорость на оси вихревого следа изменяются с ростом координаты  $x$  при  $x > 500$  м довольно слабо (см. рисунок 2).

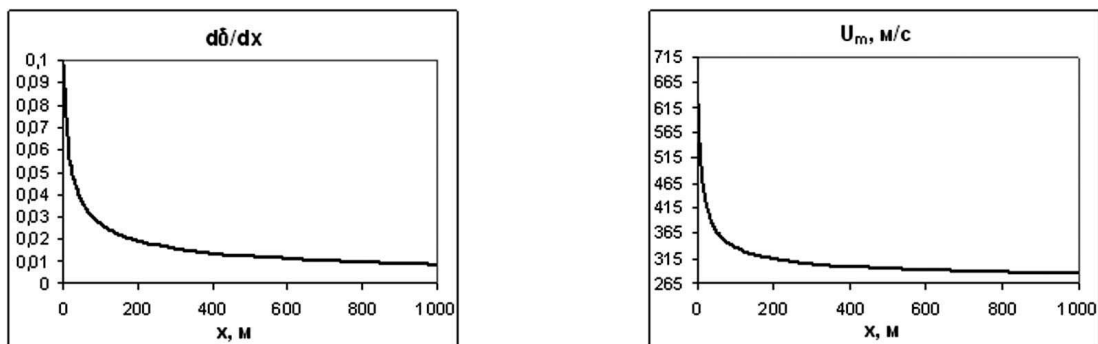


Рис. 2. Зависимости изменения полутолщины погранслоя (а) и скорости на оси струи (б) от расстояния до ЛА

Плотность насыщения водяного пара  $\rho_s$  на высоте 10 км была принята равной  $1,665 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Суммарная плотность воды (жидкой и газообразной) на расстоянии  $x = 500$  м (в области дальнего следа) была выражена через ее расход

$Q_{H_2O} = \int_0^{\delta} u_{m\infty} (\rho_{m\infty} - \rho_{\infty}) 2\pi y dy$  с учетом подобия профилей избыточных массовых концен-

траций в различных поперечных сечениях струи  $\frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho_m - \rho_{\infty}} = f\left(\frac{y}{y_{0,5}}\right)$ :

$$\rho_{H_2O} = \frac{Q_{H_2O}}{u_{m\infty} \cdot F}, \quad (5)$$

где  $u_{m\infty}$  – скорость на оси струи в области дальнего следа (индекс  $\infty$ ), найденная из решения системы (4),  $F = \pi y_{0,5}^2$  – площадь поперечного сечения вихревого следа радиуса  $y_{0,5} = 0,5\delta$  ( $y_{0,5}$  – расстояние от оси струи до точки, в которой скорость вдвое меньше, чем в ядре). При перечисленных выше значениях параметрах получим

$$\rho_{H_2O} = \frac{3,853 \text{ кг/с}}{295,4679 \text{ м/с} \cdot \pi (0,5 \cdot 11,9111 \text{ м})^2} = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3 \quad (6)$$

Плотность жидкой составляющей суммарной воды в следе  $\rho_w$  представляется в виде разницы плотностей воды в жидком и газообразном состоянии  $\rho_{H_2O}$  и насыщения водяного пара  $\rho_s$ :

$$\rho_w = \rho_{H_2O} - \rho_s = 1,17 \cdot 10^{-4} - 1,665 \cdot 10^{-5} = 1,004 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3 \quad (7)$$

Концентрация жидкой фазы определяется следующим выражением:

где  $\rho_0$  – плотность воды,  $V$  – объем аэрозольной частицы радиуса  $r_0$  в следе. Варьируя  $r_0$  в пределах от 0,001 до 2 мкм, получим ряд соответствующих значений  $n$ , которые важны для оценки оптических параметров.

#### *Расчет объемного коэффициента обратного рассеяния*

Зная  $n$  как функцию  $r_0$  в водном аэрозоле следа и объемный коэффициент обратного рассеяния  $\beta_{\pi}$  для случая  $n = 1 \text{ м}^{-3}$  (рисунок 1 г), можно легко найти объемный коэффициент обратного рассеяния ансамбля частиц  $\beta_0$  как функцию  $r_0$  для нужной нам концентрации  $n$  (рисунок 3):

$$\beta_0 = \beta_{\pi} \cdot n = f(r_0). \quad (9)$$

В диапазоне размеров частиц  $r_0 = 0,1 \dots 1$  мкм (интервал выбран как окрестность оптимального размера  $r_0 = 0,53$  мкм) величина  $\beta_0$  была принята постоянной и равной средней величине  $\beta_0^{\text{среднее}} = 5,558 \text{ м}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ .

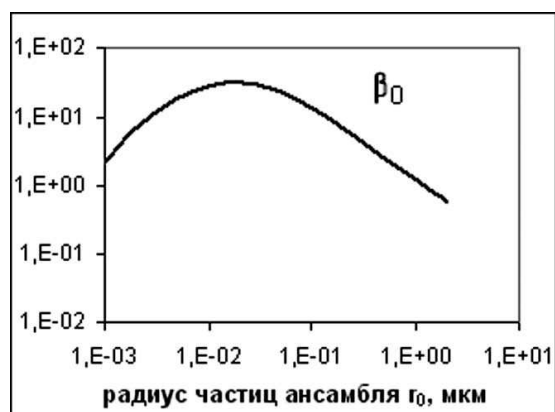


Рис. 3. Зависимость объемного коэффициента обратного рассеяния  $\beta_0$  от  $r_0$

### Бортовой панорамный PIV-лидар

Существующие на сегодняшний день технологии дистанционного измерения параметров следа имеют ряд серьезных ограничений (низкое разрешение по высоте и времени, невозможность получения информации на эшелоне на всем пути следования самолета, наличие плохих атмосферных условий, необходимость большого количества приборов для контроля всей зоны аэропорта и т.п.)

Сегодня одним из перспективных способов диагностики следа представляется бортовой оптический мониторинг «своего» следа (зондирование следа впереди летящего самолета не дало положительных результатов). Для его реализации может подойти панорамный аэрозольный лидар, восстанавливающий PIV-методом поле скорости аэрозольных частиц в вихревом следе, которые выступают в качестве трассеров. Однако надо отметить, что примесь не всегда точно следует за потоком несущей фазы. Кроме того, диаметр интересующих частиц ограничивает размер элементарной области измерения снизу, а использование более мелких трассеров сопряжено с влиянием броуновского движения на их смещение, что накладывает ограничения на мощность источника излучения и чувствительность регистрирующей аппаратуры [11]. Появление ICCD-камер (камер с большим внутренним электронно-оптическим усилением сигнала) является предпосылкой создания PIV-лидара.

Предполагаемый принцип действия прибора заключается в следующем: предающая оптическая система (ОС) лидара посылает лазерные импульсы на расстояние 10-ти размахов крыла и более (зона дальнего следа). Излучение, рассеянное аэрозольными частицами следа и регистрируемое приемной ОС, дает информацию об их положении и распределении на заданном расстоянии от ЛА, а также поле поперечной скорости в выбранном сечении. При этом конкретное расстояние, на котором фиксируется поле скорости, определяется регулируемой задержкой времени между зондирующим лазерным импульсом и срабатыванием электронного затвора ICCD-камеры.

Самым важным параметром, определяющим работоспособность любого лидара, является соотношение сигнал-шум SNR, показывающее насколько хорошо мы можем отделить сигнал, пришедший на приемник, от шума. Приемлемыми считаются его значения 100 и более.

Приведем итоговое выражение для SNR:

$$SNR = \frac{P(\lambda, R)}{N(\lambda, R)} = \frac{E_0 \cdot \beta(\lambda, R) \cdot c \cdot K(\lambda) \frac{\pi D^2}{4R^2} \frac{\tau}{N_{pix}}}{\sqrt{2P(\lambda, R)h \frac{c}{\lambda} + (h \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{n_e}{\eta})^2}}, \quad (10)$$

В числителе стоит сигнал, пришедший на приемную ОС, найденный из основного лидарного уравнения [12], в знаменателе – сумма дробового шума самого сигнала и шума считывания камеры.

В качестве камеры в данной работе была взята ICCD-камера C10054-22 Hamamatsu. Параметры лидарной системы, использованные в формуле (10), следующие:  $E_0 = 0,001 \dots 1$  Дж,  $\lambda = 0,532$  мкм,  $\beta(\lambda, R) = \beta_0^{среднее} = 5,558 \text{ м}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ,  $K(0,532 \text{ мкм}) = 0,8$ ,  $D = 0,1$  м,  $R = 500$  м,  $\tau = 5$  нс,  $N_{pix} = 659 \times 494$ ,  $n_e = 20$  – такое число выбиваемых электронов считается предельным, меньше которого сигнал будет неразличим на фоне шума считывания данной камеры,  $\eta = 0,5$ .

На основе расчета был построен график зависимости SNR от энергетики лазера  $E_0$  (рисунок 4). SNR для ансамблей водного аэрозоля с размерами частиц, лежащими в пределах  $0,1 \dots 1$  мкм, много больше единицы, а, начиная с энергии в  $0,03$  Дж, – превышает 100. Таким образом, в первом приближении оценка возможности создания панорамного PIV-лидара для бортового мониторинга собственного следа ЛА показала положительный результат.



Рис. 4. Соотношение сигнал-шум в зависимости от энергетики лазера

### Заключение

1. Перечислены основные физические процессы, влияющие на формирование и эволюцию водного аэрозоля в струйно-вихревом следе ЛА.
2. На основе расчета объемного коэффициента обратного рассеяния капель воды в вихревом следе ЛА предложена методика определения оптических свойств дисперсной фазы в следе.
3. Дана оценка границ применимости PIV-метода для построения поля скорости в струйно-вихревом следе ЛА, который может лечь в основу бортового панорамного аэрозольного лидара (панорамного PIV-лидара).
4. Показана возможность создания панорамного PIV-лидара для бортового мониторинга собственного следа ЛА.

## Литература

1. Белоцерковский А.С., Каневский М.И. «Все видят всех». Система вихревого зрения. Журнал-каталог “Транспортная безопасность и технологии”, 2007, №1 (<http://www.securpress.ru/issue/Tb/2007-1/articals/142.html>).
2. Вышинский В.В., Стасенко А.Л. Струйно-вихревой след самолета: проблемы экологии и безопасности полета // Математическое моделирование, 1999. Т. 11. №4. С.100-116.
3. Савин А.В., Коняев М.А. Отчет о НИР: Доплеровские метеолидары для систем обеспечения вихревой безопасности полетов, СПб.: БГТУ «Военмех», НПП «Лазерные системы», 2006.
4. Вышинский В.В., Стасенко А.Л. Моделирование струйно-вихревого следа тяжелого лайнера над аэродромом // Математическое моделирование, 2003. Т. 15. №11. С.69-90.
5. Гринац Э.С., Егоров Б.В., Кашеваров А.В., Ким О.В., Маркачев Ю.Е., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л. Физические свойства аэрозольного струйно-вихревого следа высотного самолета // «Труды ЦАГИ», М., 2008. Вып. 2676. С.80-119.
6. Зуев В.Е., Креков Г.М. Современные проблемы атмосферной оптики. т.2. Оптические модели атмосферы // Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256с.
7. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики // СПб.: Наука, 2003. 474с.
8. Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами // М.: Мир, 1986. 660с.
9. Васильев А.В. Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик однородных сферических частиц. 1.Одиночные частицы // Вестник СПбГУ, сер. 4: Физика, химия, 1996, вып. 4, №25. С. 3...11.
10. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй // М.: Наука, 1984. 716с.
11. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скоростей // Вычислительные технологии, 2007. Т. 12. №3. С.1-23.
12. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование // М.: Мир, 1987. 550 с.

## Efficiency estimation of laser-light scattering by aircraft vortex wake

M.A. Lobanova, A.V. Savin

*Baltic State Technical University «Voenmeh» of D.F. Ustinov,  
190005 Saint-Petersburg, 1-st Krasnoarmeiskaya str., 1  
E-mails: mashula1987@mail.ru, izooandrey@inbox.ru*

A determination method of dispersed phase optical properties along the aircraft vortex-wake is proposed on the base of water aerosol back-scattering coefficient calculations. The necessity of Panoramic PIV-lidar (Particle Image Velocimetry) creation is justified, and the possibility of its creation is estimated for the aim of boarding monitoring by aircraft itself.

**Keywords:** aircraft vortex-wake laser-light scattering, own vortex-wake monitoring, PIV-method of velocity field diagnostics.