

УДК 533.6.071.082.5

В.П.Кулеш, С.И.Иншаков, Г.Я.Масленников

*Федеральное государственное предприятие  
«Центральный аэрогидродинамический институт  
имени профессора Н. Е. Жуковского ФГУП «ЦАГИ»  
140180, г. Жуковский, Моск. обл., ул. Жуковского, 1., mera@tsagi.ru*

## **ИЗМЕРЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ВИХРЯ НАД КРЫЛОМ МОДЕЛИ ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НОЖА В СОЧЕТАНИИ С МЕТОДОМ ВИДЕОГРАММЕТРИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе представлены результаты использования видеограмметрического метода для нахождения центров вихрей, образующихся при обтекании модели самолёта в аэродинамической трубе. Определялась как траектория вихря, сходящего с самолётного закрылка так и траектория вихря, образующегося на вихрегенераторе, расположенном на мотогондоле. Визуализация ядра вихря обеспечивалась методом лазерного ножа. Рассеивающими частицами в первом случае являлась естественная запылённость потока, во втором случае использовалась длинная тонкая нить. Показано, что видеограмметрический метод может быть успешно использован для определения положения вихревых жгутов.

**МЕТОД ЛАЗЕРНОГО НОЖА, ВИДЕОГРАММЕТРИЯ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ,  
ЭКСПЕРИМЕНТ, АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из эффективных методов визуализации пространственной структуры потока газа является метод секущей световой плоскости, основанный на рассеении исследуемого потока световой плоскостью и регистрации картины распределения интенсивности света, рассеянного взвешенными в потоке мелкими частицами примеси – пара, тумана, дыма и др. Впервые этот метод как метод «парового экрана» был применен в 1951 году [1]. С появлением в начале 70-х годов лазерных источников света, обладающих более высокой плотностью светового потока и малой расходимостью, данный метод, получивший название метода «лазерного ножа», стал широко применяться в аэродинамическом эксперименте [2].

С появлением в конце 80-х годов цифровых средств регистрации изображений расширились возможности по численной обработке изображения и, в частности, появилась возможность точного измерения геометрических параметров объекта в пространстве методом видеограмметрии [3].

В данной работе предложено совмещение методов лазерного ножа и видеограмметрии для получения количественной информации о геометрии структуры исследуемого потока в пространстве.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Структурная схема измерительной системы приведена на рис. 1, а внешний вид экспериментальной установки с системой лазерного ножа в аэродинамической трубе показан на рис. 2. Система содержала узел формирования лазерного ножа, включающий лазер 1, двухлинзовую оптическую фокусирующую систему 2, цилиндрическую линзу 3, и направляющее зеркало 4, смонтированные на подвижном основании 5, а также регистрирующую цифровую камеру 6, подключенную к мобильному компьютеру 7. Подвижное основание 5 было установлено на специальном рельсе с возможностью продольного перемещения, так чтобы секущая плоскость перемещается вдоль направления потока (вдоль оси  $z$ ).

Твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой излучал свет с длиной волны 537 нм. Мощность излучения 5 Вт. Оптическая фокусирующая система, содержащая две линзы – первую отрицательную и вторую положительную, обеспечивала фокусировку пучка лучей света на расстоянии около 1,5 м в диаметр около 0,5 мм. Цилиндрическая линза 3 разворачивала пучок лучей света в горизонтальном направлении в плоскость, ширина которой на расстоянии 1,5 м составляла около 300 мм. Направляющее зеркало 4 поворачивало сформированный пучок лучей света вертикально вверх. Таким образом, на высоте около 1,5 м формировалась вертикальная секущая световая плоскость, перпендикулярная оси лазера. Внешний вид узла формирования лазерного ножа показан на рис. 3, а.

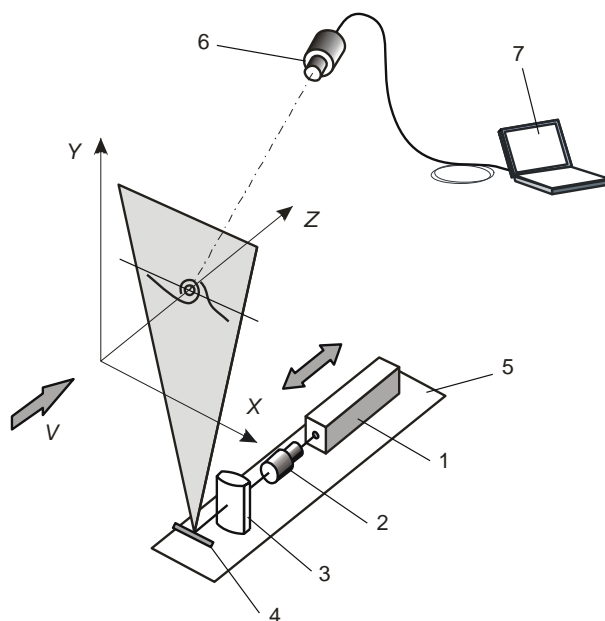


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы лазерного ножа

Цифровая камера типа «Видеоскан-285 USB» имела разрешение матрицы  $1392 \times 1040$  пикселей (физический размер матрицы  $8,8 \times 6,6$  мм, шаг пикселей 6,45 мкм). Передача информации к компьютеру осуществлялась через порт USB-2. Внешний вид узла камеры показан на рис. 3, б.

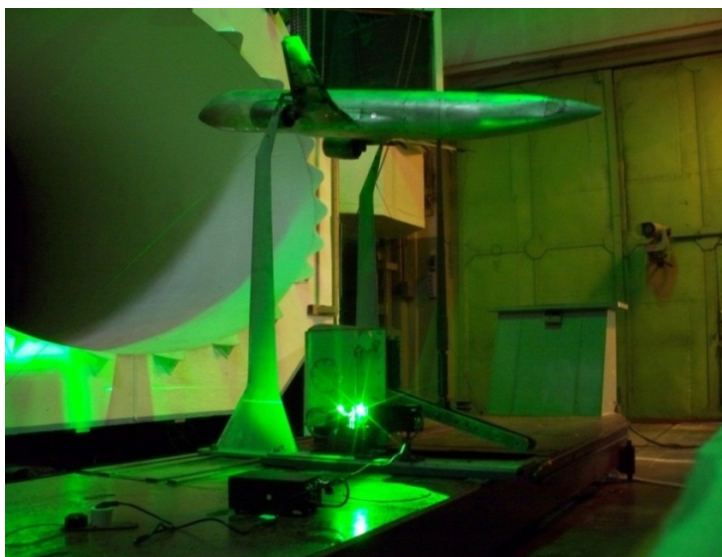
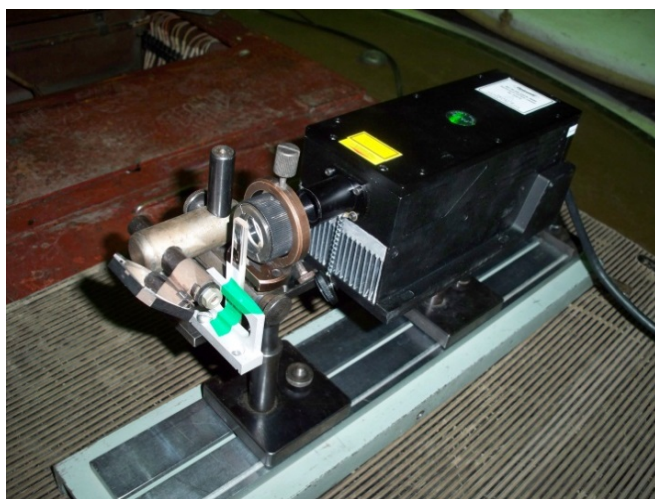
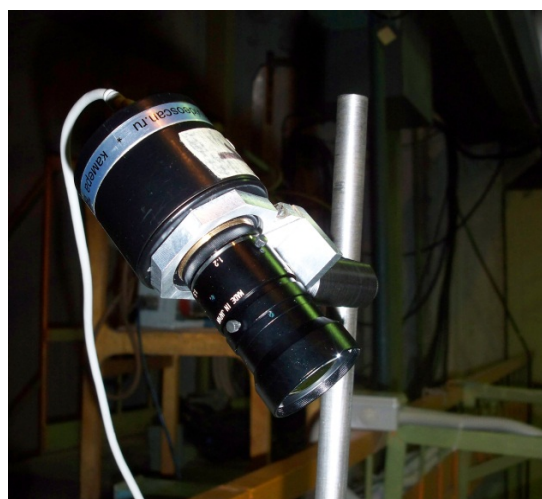


Рис. 2. Экспериментальная установка с лазерным ножом в аэродинамической трубе Т-103



а) узел лазерного ножа



б) регистрирующая камера

Рис. 3. Узлы измерительной системы лазерного ножа

Тест-объект для калибровки видеogramметрической системы (ВГМ калибровки) планшетного типа, содержал набор маркеров, расположенных в одной плоскости в узлах прямоугольной сетки размером  $20 \times 30$ . Диаметр маркеров 2 мм, шаг по обеим осям 10 мм. Сетка маркеров была спроектирована в компьютере с помощью приложения CorelDraw, распечатана с помощью лазерного принтера на листе бумаги формата А4 и наклеена на легкую плоскую панель ПВХ. Панель с помощью юстировочного узла крепилась на стойке и устанавливалась около модели в заданном сечении с известной координатой  $z$ .

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Разработанный метод был опробован при исследованиях вихревой структуры за элементами модели пассажирского самолета в дозвуковой аэродинамической трубе Т-103. При этом решались две задачи. В первом случае целью испытаний были измерения

траектории вихря, сходящего с кромки выпущенного закрылка модели пассажирского самолета. Модель располагалась в нормальном положении, и регистрирующая цифровая камера была установлена сзади сверху над срезом диффузора аэродинамической трубы и ориентирована своей оптической осью на угол закрылка, с которого сходит вихрь. Исходя из необходимой зоны охвата области визуализации, был выбран объектив с фокусным расстоянием 75 мм. Расстояние от главной точки приемного объектива до объекта исследований составляло  $L_0 = 3540$  мм. В качестве рассеивающих частиц использовались частицы естественной запыленности.

Испытания проводились при скорости набегающего потока 50 и 80 м/с. В каждом случае регистрация изображений проводилась в 9 сечениях с интервалом 50 мм по потоку, начиная с сечения  $z = 10$  мм. В каждом положении лазерного ножа регистрировалась серия из 10 – 15 кадров для последующей фильтрации. На рис. 4, а показан пример исходного рабочего изображения. Предварительная обработка состояла в медианной фильтрации каждой точки изображения на сквозной выборке по серии кадров. Результат фильтрации показан на рис. 4, б.

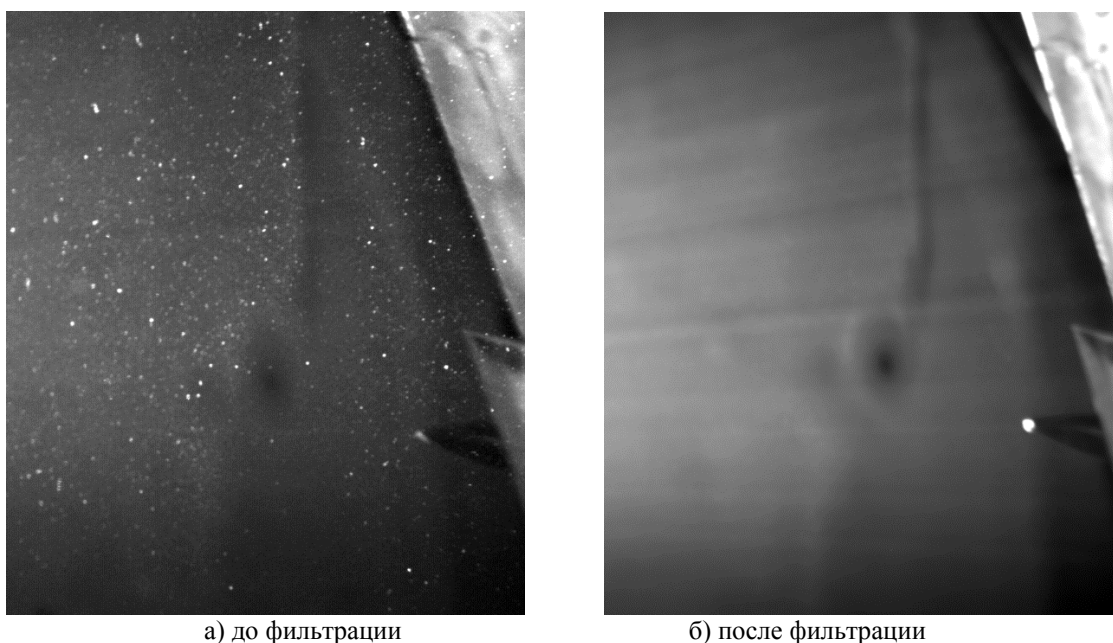


Рис. 4. Пример фильтрации рабочего изображения

Результатом преобразования по методу видеограмметрии координат  $u, v$  каждой точки изображения в координаты  $x, y$  при известной координате  $z$  положения секущей световой плоскости стали изображения, трансформированные в координатную плоскость  $Oxy$  (рис. 5). Координаты  $x_0, y_0$  центра ядра вихря на трансформированных изображениях определялись как положение минимума освещенности в пятне.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 6 приведен график траектории центра вихря в зависимости от координаты  $z$  секущей световой плоскости. Видно, что вихрь двигался по нисходящей траектории. Различия в траектории вихря при скорости 50 и 80 м/с находятся в пределах погрешности измерений.

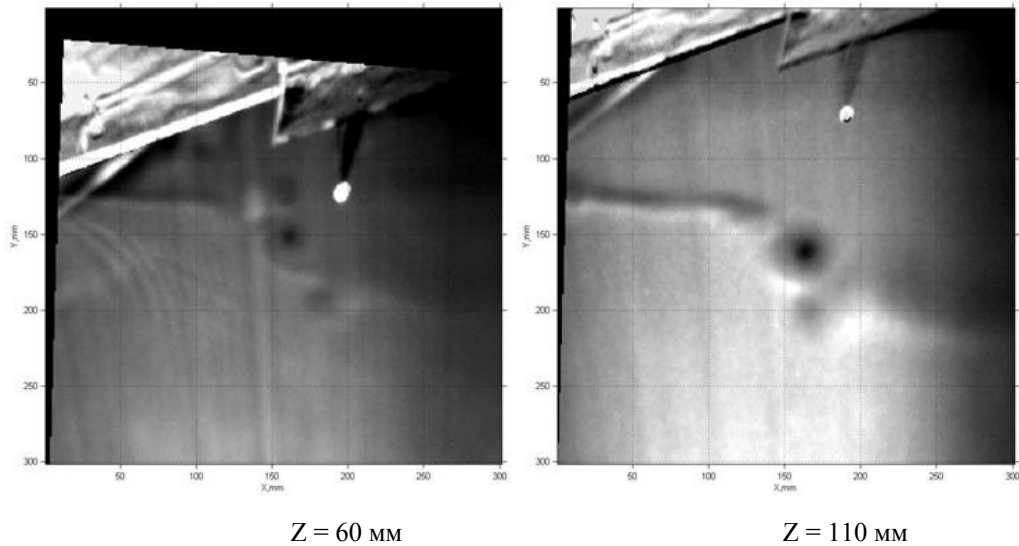


Рис. 5. Примеры изображений, трансформированных в плоскость  $Oxy$  (плоскость предмета, см. рис. 2)

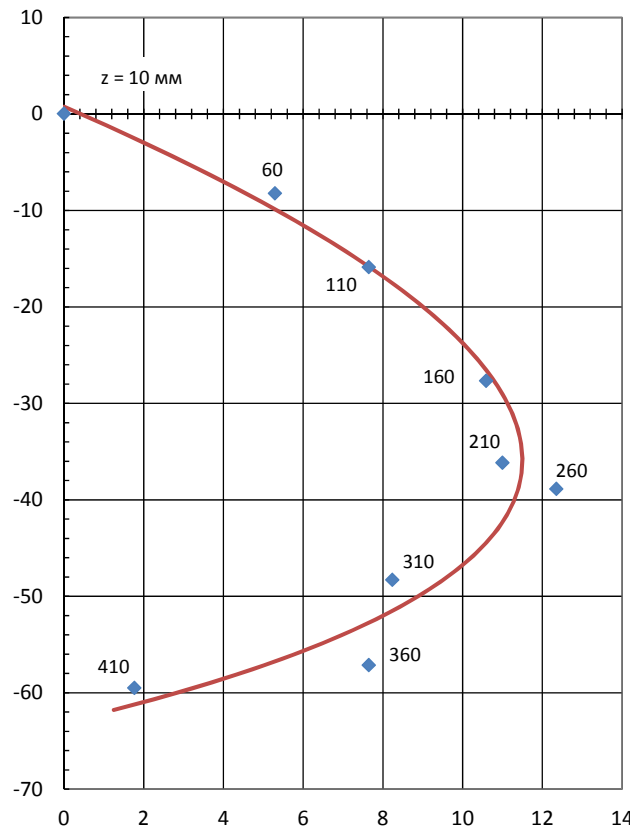


Рис. 6. Траектория центра вихря, сходящего с конца закрылка

На втором этапе проводились измерения траектории вихря, сходящего с вихрегенератора на мотогондоле, над крылом. В этом случае модель находилась в перевернутом положении. Поэтому цифровая камера была установлена спереди снизу под соплом аэродинамической трубы и ориентирована своей оптической осью на конец вихрегенератора. Расстояние от главной точки приемного объектива до объекта исследований составляло  $L_0 = 1660$  мм. Для необходимой зоны охвата был выбран объектив с фокусным расстоянием 50 мм. Особенностью этого течения является то, что вихрь распространяется вблизи поверхности крыла и лазерный нож неизбежно падает на твердую поверхность, рассеяние света с которой на 3 – 4 порядка выше, чем рассеяние от частиц.

Поэтому использование не только естественной пыли, но и введение специального аэрозоля в поток не позволяют выделить изображение ядра вихря на фоне сильной засветки от поверхности.

Для визуализации ядра вихря в этом случае было предложено использование длинной, но тонкой и легкой шелковинки, прикрепленной к концу вихрегенератора. Под действием сил в вихре шелковинка вращается, и подсвеченная ее точка описывает в световой плоскости фигуры, близкие к окружности с центром, совпадающим с центром вихря. При времени регистрации больше, чем период вращения шелковинки, можно зафиксировать один или несколько оборотов. Оцифровывая траектории следа шелковинки в секущей световой плоскости, можно определить координаты центра и видимые размеры вихря. Регистрация изображений проводилась в 9 сечениях с интервалом 20 мм, начиная с сечения  $z = -72$  мм, приблизительно соответствующего плоскости конца вихрегенератора (координата  $z$  отсчитывалась от входного сечения мотогондолы). На рис. 7 приведены примеры визуализации по методу с шелковинкой и результаты измерений положения центра и контура ядра вихря с вихрегенератора при скорости набегающего потока 20 м/с. На графиках показаны также участки поверхности фюзеляжа и крыла, на который падает секущая световая плоскость.

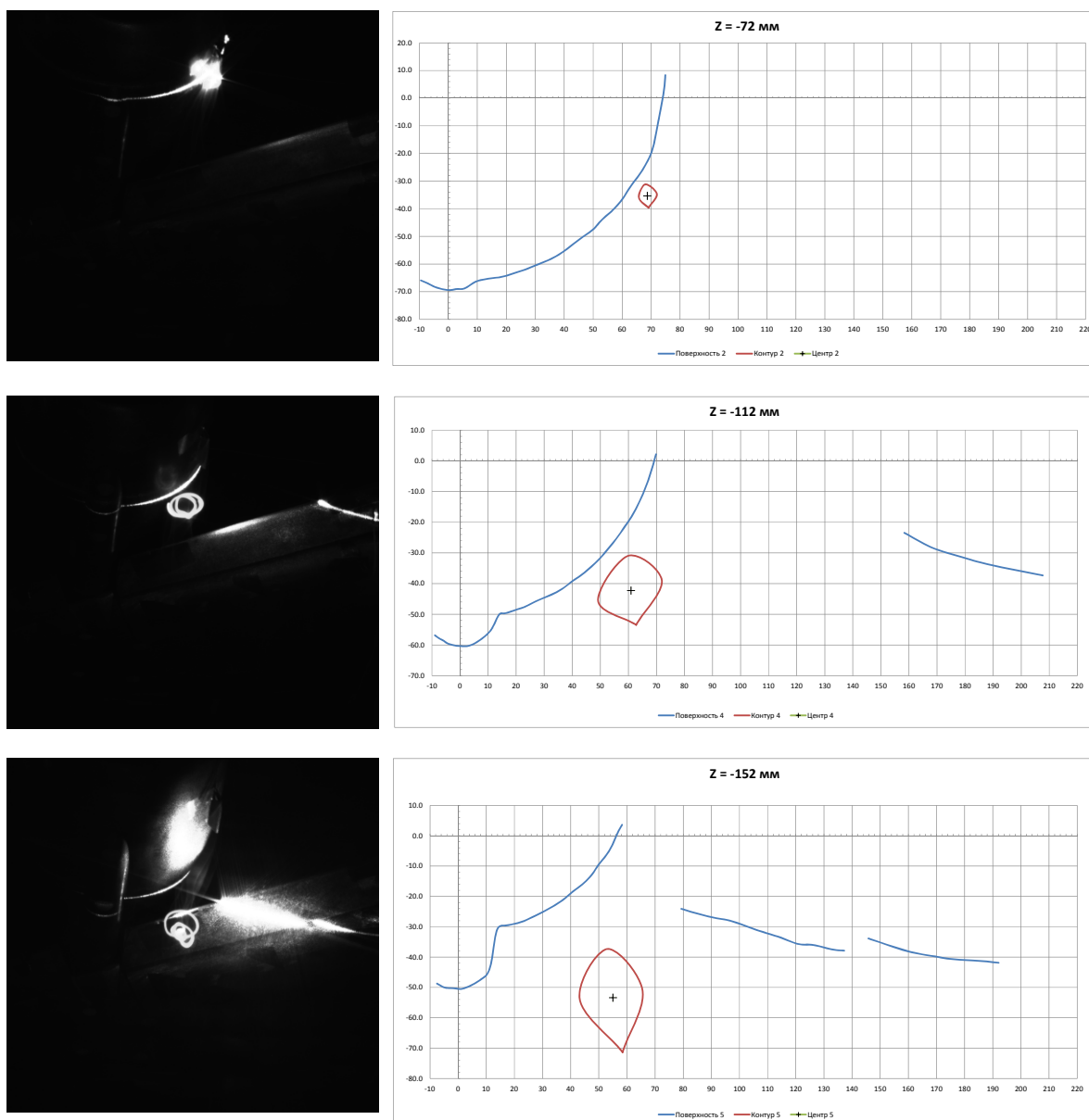


Рис. 7. Результаты определения траектории вихря с вихрегенератора

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Показано, что метод видеограмметрии совместно с методом лазерного ножа пригоден для определения координат ядер вихрей при соответствующей обработке исходных изображений.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **McGregor J.** The vapour-screen method of flow visualization //Journal of Fluid Mechanics. 1961, V.11, part 4.
2. **Боровой В.Я., Иванов В.В., Орлов А.А., Харченко В.Н.** Визуализация пространственного обтекания моделей с помощью «лазерного ножа» // Учёные записки ЦАГИ. 1973, Т.4, №5.
3. **Горшков М.И., Иванов Б.А.** Установка «лазерный нож» для визуализации пространственного обтекания моделей в аэродинамической трубе. Труды ЦАГИ. 1977, вып. 1881.
4. **Кулеш В.П.** Бесконтактные измерения геометрических параметров формы, движения и деформации объектов в экспериментальной аэродинамике // Датчики и системы, 2004, № 3.

V.P. Kulesh, S.I. Inshakov, G.Ya. Maslennikov

Federal state unitary enterprise "the Central Aero-Hydrodynamics Institute  
named by professor N. Ye. Zhukovsky" FGUP "TsAGI"  
140180, Zhukovskiy, Mosk. reg., Zhukovskiy str 1., mera@tsagi.ru

## **MEASUREMENTS OF VORTEX TRAJECTORY NEAR WING OF MODEL PASSENGER AIRPLANE BY MEANS OF LASERS SHEET AND VIDEOGRAMMETRY METHOD**

### **ANNOTATION**

Work presents the results of using the videogrammetry method for finding the centers of the vortices, which are formed within the flow around model airplane in the wind tunnel. Was defined both the vortex path, which descends from the aircraft flap and vortex path, which is formed on the vortex generator, located on the pod. The visualization of vortex core was ensured by the method of laser knife. The natural dustiness of flow was the scattering particles in the first case, in the second case was used long thin thread shown that the videogrammetry method can be successfully used for determining the position of vortex filaments.

METHOD OF LASER KNIFE, VIDEOGRAMMETRIY, VISUALIZATION, EXPERIMENT, THE WIND TUNNEL