



УДК 53.087.62

В.П. Кулеш, Г.Е. Швардыгулов

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского,  
Россия, 140180, Жуковский, Жуковского ул., 1, E-mail: [info@tsagi.ru](mailto:info@tsagi.ru)

## **БЕСКОНТАКТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МОДЕЛИ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА МЕТОДОМ ВИДЕОГРАММЕТРИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

В данной работе рассмотрена возможность применения бесконтактного метода видеограмметрии с одной камерой при исследовании параметров движения модели лопасти несущего винта вертолета. Метод применен в аэродинамической трубе Т-104 ЦАГИ. Получены удовлетворительные результаты, оценены погрешности.

**ВИДЕОГРАММЕТРИЯ, ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ, БЕСКОНТАКТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ,  
МЕТОД ВИДЕОГРАММЕТРИИ, ДЕФОРМАЦИИ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Большой класс механизмов и машин составляют вращающиеся объекты. В частности, в аэрогазодинамике – это компрессоры, турбины, вентиляторы, воздушные и несущие винты, винтовентиляторы и другие лопаточные машины. Многие из них вращаются с высокой угловой скоростью. Под действием комплекса инерциальных, аэродинамических и других нагрузок элементы этих механизмов, например, лопасти воздушных винтов или винтовентиляторов, претерпевают заметные деформации. Эти деформации могут приводить к изменению основных свойств лопасти и воздушного винта в целом. Поэтому измерение деформаций лопасти на разных режимах работы воздушного винта является одной из основных задач аэродинамического эксперимента.

Контактные измерения деформации таких вращающихся объектов, например, с помощью тензометрии, наталкиваются на ряд труднопреодолимых проблем, связанных с влиянием инерциальных перегрузок, действующих на чувствительный элемент, влиянием массы чувствительного элемента и коммутационных линий на массо-упругие свойства объекта исследований, проблемы передачи сигналов с вращающегося объекта и др.

Свободными от подобных недостатков являются бесконтактные оптические методы исследований деформации вращающихся объектов, в частности методы видеограмметрии. Ранее были разработаны и успешно применяются видеограмметрические методы для измерения геометрических параметров формы, движения и деформации моделей летательного аппарата в потоке аэродинамических труб [1; 3], в том числе и вращающихся [4; 5]. Наиболее близким аналогом решения поставленной задачи является видеограмметрический метод изучения деформации натуральных лопастей несущего винта вертолета [4]. Однако в последнем случае значительные размеры объекта исследования ( $R = 5 - 13$  м) и сравнительно невысокие угловые скорости вращения (до 350 – 400 об/мин) позволили разместить измерительную головку на втулке несущего винта. При испытаниях других лопаточных машин, например, винтовых приборов, много меньшие размеры исследуемых элементов ( $R = 200 - 300$  мм) и

более высокие скорости вращения (5000 – 10000 об/мин) не позволяют применить разработанный метод.

Целью данной работы является разработка метода бесконтактных оптических измерений геометрических параметров движения лопастей вращающегося в высокой скорости воздушного винта или винтовентилятора на разных режимах работы, основанного на видеограмметрическом методе с маркерными точками.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ДОКЛАДА

### Экспериментальная установка и объект исследования

Испытания проводились на вертолетном приборе ВП-6 в аэродинамической трубе Т-104 ЦАГИ, вид экспериментальной установки, установленной в рабочей части показан на рисунке 1. Винт содержал две лопасти. Объектом исследования служила модель двухлопастного несущего винта вертолета в потоке аэродинамической трубы Т-104. Винт имеет две укороченные лопасти. Ширина лопастей 260 мм. Диаметр винта 4 м.

Для реализации метода видеограмметрии с маркерами на каждую лопасть была нанесена одинаковая сетка маркеров, включающая 4 основных сечения по 4 маркера в каждом. Вид лопастей с маркерами показан на рисунке 2. Для идентификации лопастей на рабочих изображениях на лопасти 2 был добавлен маркер посередине между 3 и 4 сечениями. Кроме указанных четырех сечений на комле, узле крепления лопасти, четырех рукавах втулки и на торце вала винта нанесены дополнительные маркеры. Диаметр всех маркеров 14 мм. Маркеры изготовлены из ретроотражающей пленки и наклеены на поверхность лопасти и узлы втулки.

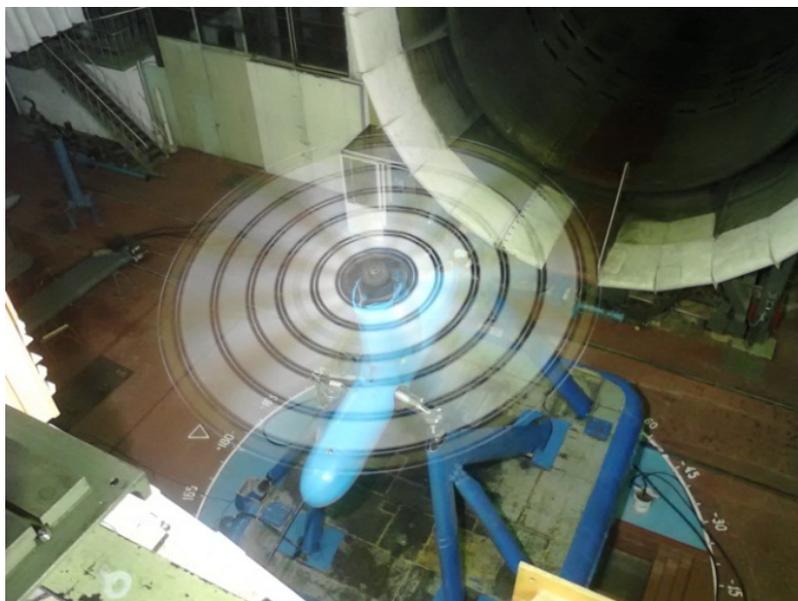


Рис. 1. Вертолетный прибор ВП-6 в рабочей части аэродинамической трубы Т-104 ЦАГИ



Рис. 2. Лопасти с нанесенными на поверхность маркерами

## Метод измерений

Для разрешения неопределенности задачи восстановления искомым координат  $x, y, z$  в пространстве применен метод использования априорной информации, полученной из других источников [3]. При этом измерения можно производить по одному изображению, с помощью одной регистрирующей цифровой камеры. Этот способ чаще всего сводится к методу маркерных точек, при котором на поверхность исследуемого объекта в заданных точках наносятся специальные маркеры, хорошо различимые на получаемых изображениях. При этом рабочая характеристика измерительной системы может быть записана в виде системы двух нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned}
 x &= (z - z_0) \frac{M_{11}(u - u_0) + M_{12}(v - v_0) + M_{13}w_0}{M_{31}(u - u_0) + M_{32}(v - v_0) + M_{33}w_0} + x_0, \\
 y &= (z - z_0) \frac{M_{21}(u - u_0) + M_{22}(v - v_0) + M_{23}w_0}{M_{31}(u - u_0) + M_{32}(v - v_0) + M_{33}w_0} + y_0,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где:  $u_0, v_0$  – координаты центра изображения - точки пересечения оптической оси приемного объектива с плоскостью чувствительной матрицы цифровой камеры (выражаются в пикселях);

$w_0$  – задний отрезок приемного объектива (в пикселях);

$x_0, y_0, z_0$  – координаты центра приемного объектива (центра проекции) в системе координат модели (в метрических единицах);

$M_{ij}$  – элементы матрицы вращения - направляющие косинусы. Элементы матрицы вращения являются функциями углов ориентации  $\alpha, \beta, \gamma$  системы координат камеры в системе координат объекта.

## Модель движения лопасти

В данной работе априорная информация была задана моделью движения лопасти. Предварительный анализ изображений позволил сформулировать следующие особенности движения лопасти:

– лопасть достаточно жесткая для того, чтобы локальными деформациями изгиба и крутки можно было бы пренебречь;

– маховое движение лопасти обусловлено деформацией изгиба ее комля, который можно интерпретировать как сосредоточенный упругий шарнир. Радиус положения этого шарнира принят равным  $r_{ш} = 490$  мм. Отклонения всех точек лопасти при маховом движении аппроксимируются полиномом 3 степени

$$\Delta z = c_0 + c_1 \cdot \rho + c_2 \cdot \rho^2 + c_3 \cdot \rho^3 \quad (2)$$

по относительному аргументу

$$\rho = \frac{x - r_{ш}}{R - r_{ш}},$$

где  $R$  – радиус конца лопасти,  $R = 2000$  мм.

– угол  $\varphi$  установки лопасти определяется аппроксимацией вращения всех точек лопасти с учетом махового движения вокруг горизонтальной оси рукава

$$\begin{cases} y_\varphi = y \cdot \cos \varphi - (z + \Delta z) \sin \varphi \\ z_\varphi = y \cdot \sin \varphi + (z + \Delta z) \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

– угол  $\psi$  азимутального движения определяется аппроксимацией вращения всех найденных точек лопасти вокруг вертикальной оси ротора

$$\begin{cases} x_\psi = y_\varphi \cdot \cos \psi - x \cdot \sin \psi \\ y_\psi = y_\varphi \cdot \sin \psi + x \cdot \cos \psi \\ z_\psi = z_\varphi \end{cases} \quad (4)$$

Кроме того, возникла необходимость дополнить модель движения лопасти параметрами  $\delta x$  и  $\delta y$  биения оси вращения винта.

Эта модель движения лопасти, будучи присоединенной к рабочей характеристике (1), дала возможность разрешить неопределенность задачи восстановления координат маркеров и, в частности, определить значения основных геометрических параметров  $c_0, c_1, c_2, c_3, \psi, \varphi$  движения лопасти.

## Результаты

Результатами измерений явились все параметры движения, в том числе:

– параметры  $c_0, c_1, c_2, c_3$  формы упругой линии лопасти в вертикальной плоскости, по которым вычисляется форма упругой линии лопасти. На рисунке 3 приведены примеры формы упругой линии двух лопастей при скорости набегающего потока  $V = 30$  м/с, скорости вращения  $n = 380$  об/мин и тяге винта  $T = 90$  кгс;

– траектория движения конца лопастей в вертикальной плоскости. На рис. 4 представлен график движения конца одной из лопастей. Непрерывные линии - результат аппроксимации данных рядом Фурье второго порядка.

Найденные параметры позволили построить реверсную математическую модель движения каждой лопасти. Если сопоставить эту модель с результатами отдельных измерений координат точек, то можно получить картину локальных деформаций. На рис.5 показан пример картин распределения локальных деформаций изгиба и кручения лопасти 1 на рассмотренном режиме вращения.

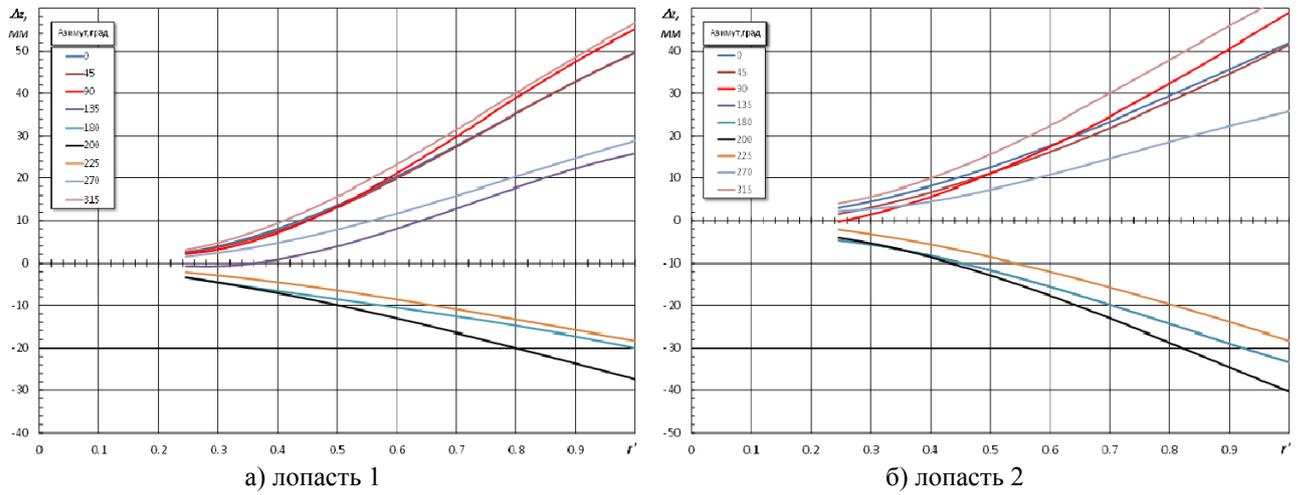


Рис. 3. Формы упругой линии двух лопастей в вертикальной плоскости при  $V = 30$  м/с,  $\eta = 380$  об/мин, различные азимутальные углы выделены различными цветами

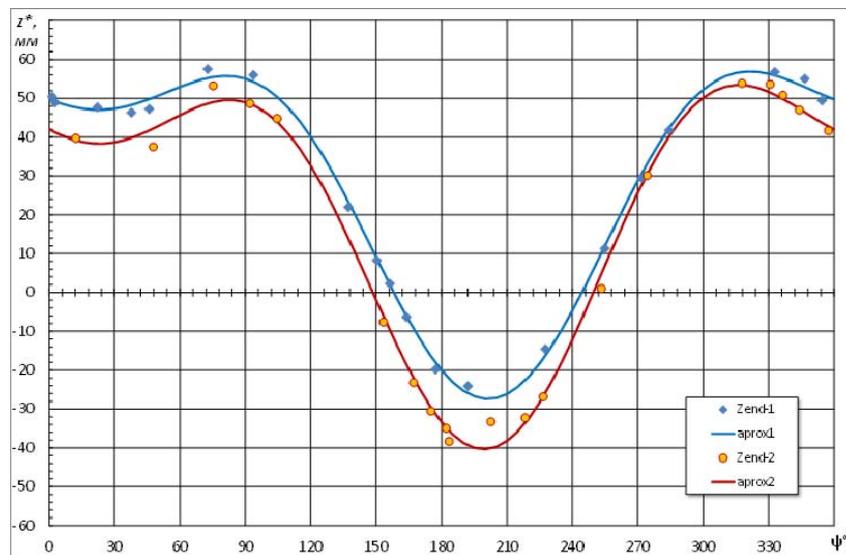


Рис. 4. Траектория азимутального движения концов двух лопастей

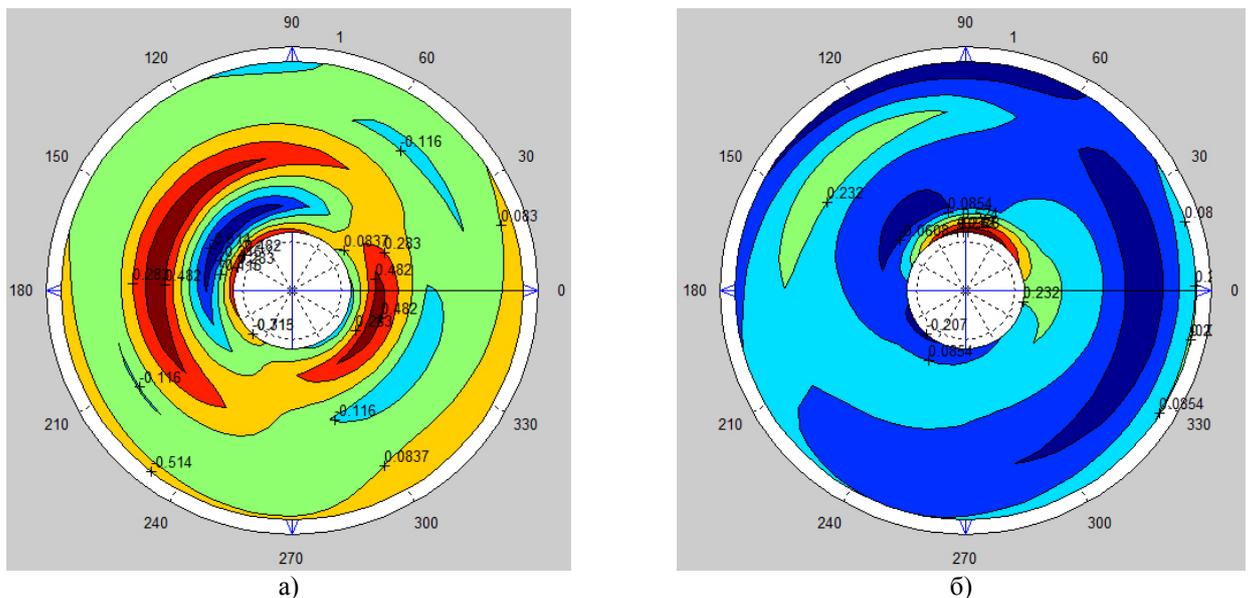


Рис. 5. Картины распределения локальных деформаций изгиба (а) и кручения (б) лопасти 1

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$T$  – тяга винта, кгс;

$V$  – скорость, м/с;

$\eta$  – частота оборота винта, об/мин.

Индексы:

ш – шарнирный.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кулеш В.П., Фонов С.Д.** Измерение параметров движения и деформации модели самолета в аэродинамической трубе методом видеogramметрии // Ученые записки ЦАГИ. 1998. т. XXIX. №1–2. С.165–176.
2. **Burner A.W., Tianshu Liu.** Videogrammetric model deformation measurement technique. // J. of Aircr. 2001. 38. 4. P. 745-754.
3. **Кулеш В.П.** Бесконтактные измерения геометрических параметров формы, движения и деформации объектов в экспериментальной аэродинамике // Датчики и системы. 2004. №3. С. 22– 27.
4. **Bosnjakov S.M., Kulesh V.P., Fonov S.D. et al.** Videogrammetric system for studying of movement and deformation of real– scaled helicopter rotor blades // SPIE. 1999. Vol. 3516, 0277– 786X/99. Part One. P.196– 209.
5. **Иншаков С.И., Кулеш В.П., Мошаров В.Е., Радченко В.Н.** Видеogramметрический метод бесконтактных измерений мгновенной деформации лопастей вращающихся воздушных винтов // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. XLIV. №4. С. 72–79.

V.P. Kulesh, G.E. Shvardygulov

*TsAGI (Central Aerohydrodynamic Institute)*

*Russia, 140180, Zhukovsky, Zhukovsky str., 1, E-mail: [info@tsagi.ru](mailto:info@tsagi.ru)*

## VIDEOGRAMMETRIC NON-CONTACT METHOD OF MEASUREMENTS OF DEFORMATION OF THE MODEL OF HELICOPTER'S BLADE

### ANNOTATION

*The present article tells about an opportunity of using non-contact method of videogrammetry with one camera in investigation of movement of a helicopter model's blade. This method was applied in wind tunnel AT-104 in TsAGI. This article contains information about idea, results and accuracy of this method.*

VIDEOGRAMMETRY, MEASUREMENTS OF COORDINATES, NON-CONTACT, DEFORMATION