

## Бесконтактные измерения деформации лопасти воздушного винта в потоке аэродинамической трубы Т-107

*В.П.Кулеш<sup>1,2</sup>, В.Е.Мошаров<sup>1,2</sup>, В.Н.Радченко<sup>1</sup>, С.И.Иншаков<sup>1</sup>, Г.Е.Швардыгулов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Центральный аэро-гидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

Оптические измерения деформации лопасти воздушного винта в потоке аэродинамической трубы Т-107, которые проводились в АДТ Т-107 в рамках контракта с компанией Snesta (Франция), выполнены разработанным в ЦАГИ методом видеограмметрии (ВГМ). Объектом измерений деформации служила одна лопасть модели однороторного воздушного винта, установленного на винтовом приборе ВП-107. Радиус винта составлял 423 мм. Диаметр ступицы 176 мм. Число лопастей на роторе – 8.

Видеограмметрическая система, разработанная для данного проекта, включала цифровую камеру, систему управления и регистрации изображений на базе персонального компьютера, импульсную лампу с источником питания и электронную систему синхронизации. Цифровая камера имела ПЗС матрицу размером 4/3" с разрешением 2000×2000 пикселей (размер пикселя 7.4×7.4 мкм) и 12-битный АЦП. Камера была оснащена приемным объективом с фокусным расстоянием  $F = 50$  мм. Импульсная лампа создавала вспышки света длительностью около 3 мкс и энергией 4.6 Дж. Система синхронизации состояла из оптоэлектронной пары светодиод-фотодиод, расположенной изнутри на кожухе винтового прибора и контрастной светоотражающей метки, нанесенной на обод вращающегося ротора винта. Электрический синхроимпульс вырабатывался в момент, когда светоотражающая метка пересекала чувствительную зону оптоэлектронной пары. Для регистрации очередного кадра от кнопки оператора создавался командный импульс, который поступал на вход внешней синхронизации цифровой камеры, инициируя начало ее работы. При открытии электронного затвора в камере вырабатывался ответный строб-импульс, в момент совпадения которого с синхроимпульсом от оптоэлектронной пары создавался импульс поджига импульсной лампы.

Импульсная лампа и цифровая камера были установлены за оптическими окнами в верхней области стенки рабочей части аэродинамической трубы Т-107 перед плоскостью вращения приблизительно на 700 мм. Система управления и регистрации изображений была расположена в кабине управления и соединена с камерой, лампой и системой синхронизации кабелями длиной 30 м.

Измерительная система координат была задана так, что ось  $Oz$  была совмещена с осью втулки лопасти, начало  $O$  выбрано на оси вращения ротора, а оси  $Ox$  направлена от передней кромки к задней параллельно хорде профиля в сечении 0.75 радиуса (рисунок 1).

На верхней поверхности испытуемой лопасти была нанесена сетка маркеров, распределенных по 10 сечениям на относительных радиусах от  $R = 0.25, 0.28, 0.32, 0.35$  и далее до 0.95 с интервалом 0.1. Схема расположения маркеров на лопасти показана на рисунке 2. В каждом сечении кроме последнего размещены по 5 маркеров с шагом 8 мм. В последнем сечении поместились только 4 маркера. Между первым и вторым сечениями был помещен дополнительный ключевой маркер. Диаметры маркеров составляли 1.5 – 2 мм. Маркеры были нанесены белой краской на предварительно окрашенную в черный цвет поверхность.

Координаты всех маркеров были предварительно рассчитаны по 3D модели лопасти. На рисунке 3 показаны профили (Profile) всех сечений, на которых отмечены положения маркеров (xyz50.txt).

На рисунке 4 приведено одно из серии рабочее изображение ротора воздушного винта с лопастью в положении измерения, полученное с помощью цифровой камеры. Система синхронизации была настроена так, что положение измерения лопасти составляет около 35° от верхней вертикали по ходу вращения.

Калибровка измерительной системы осуществлялась в два этапа. На первом были найдены параметры внутреннего ориентирования рабочей характеристики камеры с настроенным объективом. Эта процедура выполнялась в лабораторных условиях с применением эталонного контрольного приспособления (тест-объекта). Второй этап калибровки, называемый

автокалибровкой, выполнялся неоднократно по ходу эксперимента непосредственно на экспериментальной установке при смонтированной и полностью настроенной оптической системе. На этом этапе определялись текущие значения параметров внешнего ориентирования рабочей характеристики системы ВГМ.

Обработка изображений для каждого пуска выполнялась в пакетном режиме с помощью специализированных программ и включала следующие основные процедуры:

- измерение координат образов маркеров на изображениях;
- определение текущих параметров внешнего ориентирования рабочей характеристики для каждого кадра;
- вычисление координат  $x, y, z$  всех маркеров с помощью найденных текущих параметров рабочей характеристики и смещений по координатам от исходного недеформированного состояния;
- вычисление параметров деформации изгиба  $Dx$  и  $Dy$  и кручения  $Da$  лопасти в каждом сечении путем совмещения методом наименьших квадратов маркеров сечения в недеформированном и деформированном состояниях;
- графическую 3D визуализацию смещений по координатам для всех маркеров в виде полей по сетке  $10 \times 5$  точек.

В момент измерений лопасть помимо искомым деформаций претерпевала значительные перемещения, обусловленные вращением ротора и задержкой момента срабатывания импульсной лампы. Для исключения этих смещений лопасти для каждого рабочего изображения проводилась индивидуальная привязка системы координат. Для этого использовалась группа 21 базовых маркеров 4 сечений в комлевой части лопасти. По базовым маркерам процедурой автокалибровки для каждого рабочего изображения определялись текущие значения параметров внешнего ориентирования рабочей характеристики, которые затем применялись для вычисления координат маркеров во всех остальных сечениях.

Параметры деформации изгиба  $Dx$  и  $Dy$  определялись как смещения по осям условной точки оси жесткости крыла в сечении. Параметры деформации кручения  $Da$  вычислялись как углы поворота маркеров сечения как целого вокруг этой точки. Стандартные отклонения  $STDx$  и  $STDy$  при совмещении маркеров методом наименьших квадратов являются хорошим индикатором общей погрешности измерений. Примеры распределений по относительному радиусу  $R$  параметров деформаций изгиба и кручения лопасти приведены на рисунках 5 и 6.

## Литература

1. *Kulesh V.P., Bosniakov S.M. [и др] Videogrammetric system for studying of movement and deformation of real-scaled helicopter rotor blades // SPIE. 1999. V. 3516, 0277-786X/99. P. 196-209.*
2. *Кулеш В.П. Бесконтактные измерения геометрических параметров формы, движения и деформации объектов в экспериментальной аэродинамике // Датчики и системы. 2004. № 3. С. 22-27.*
3. *С.И. Иншаков, В.П. Кулеш, В.Е. Мошаров, Н. Радченко Видеogramметрический метод бесконтактных измерений мгновенной деформации лопастей вращающихся воздушных винтов // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. XLIV. № 4. С. 72-79.*

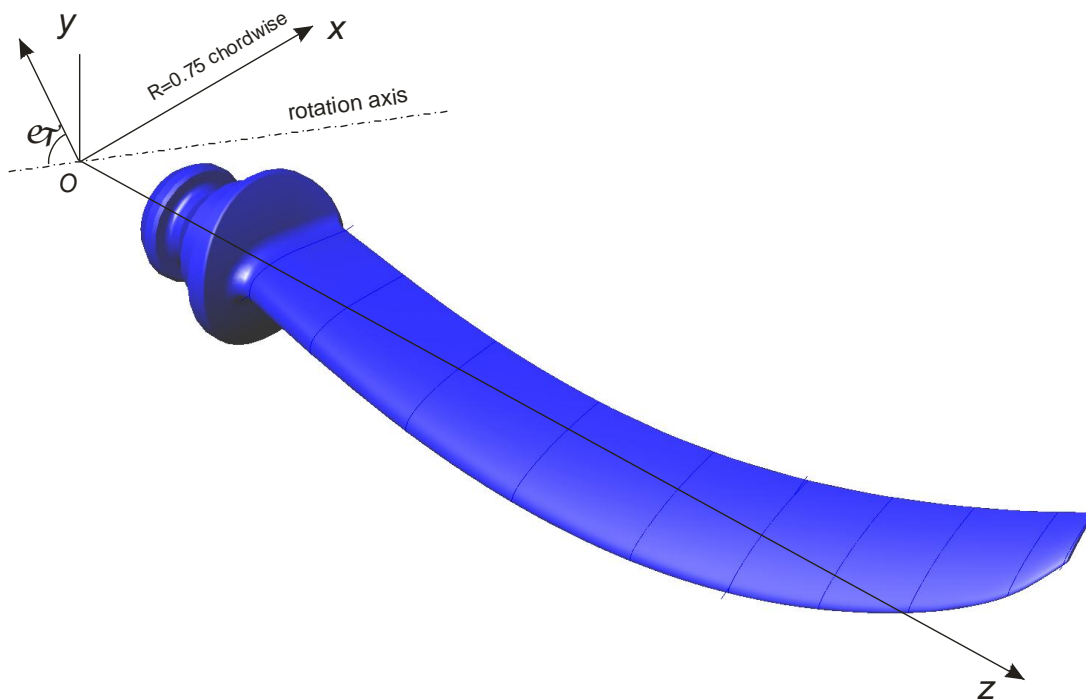


Рисунок 1 Измерительная система координат лопасти

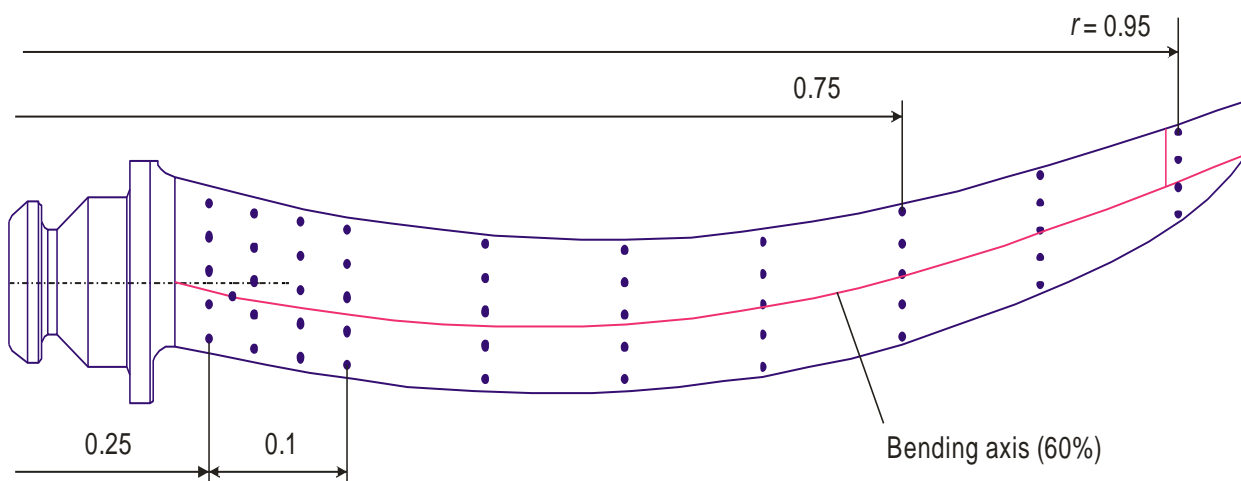


Рисунок 2 Схема расположения маркеров на лопасти

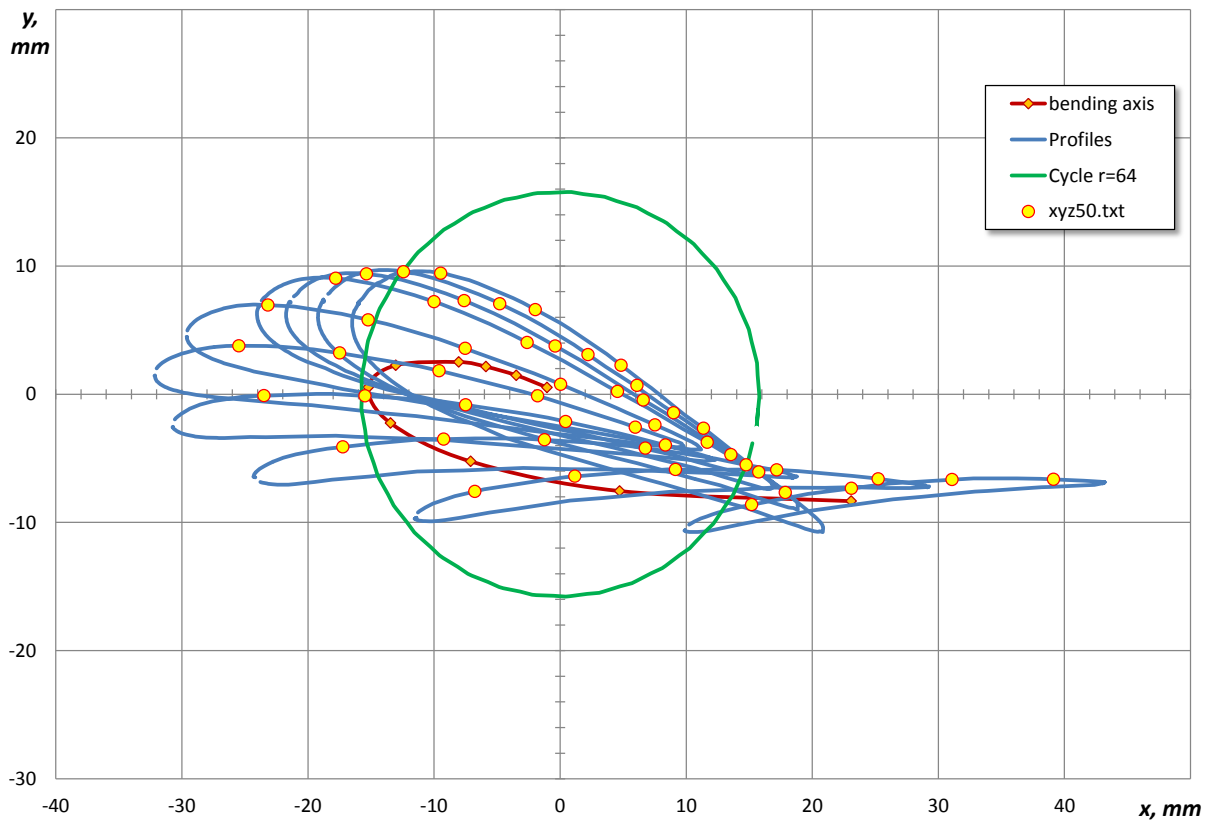


Рисунок 3 Схема размещения маркеров и положения оси изгиба на профиле



Рисунок 4 Рабочее изображение ротора воздушного винта с рабочей лопастью в положении измерения

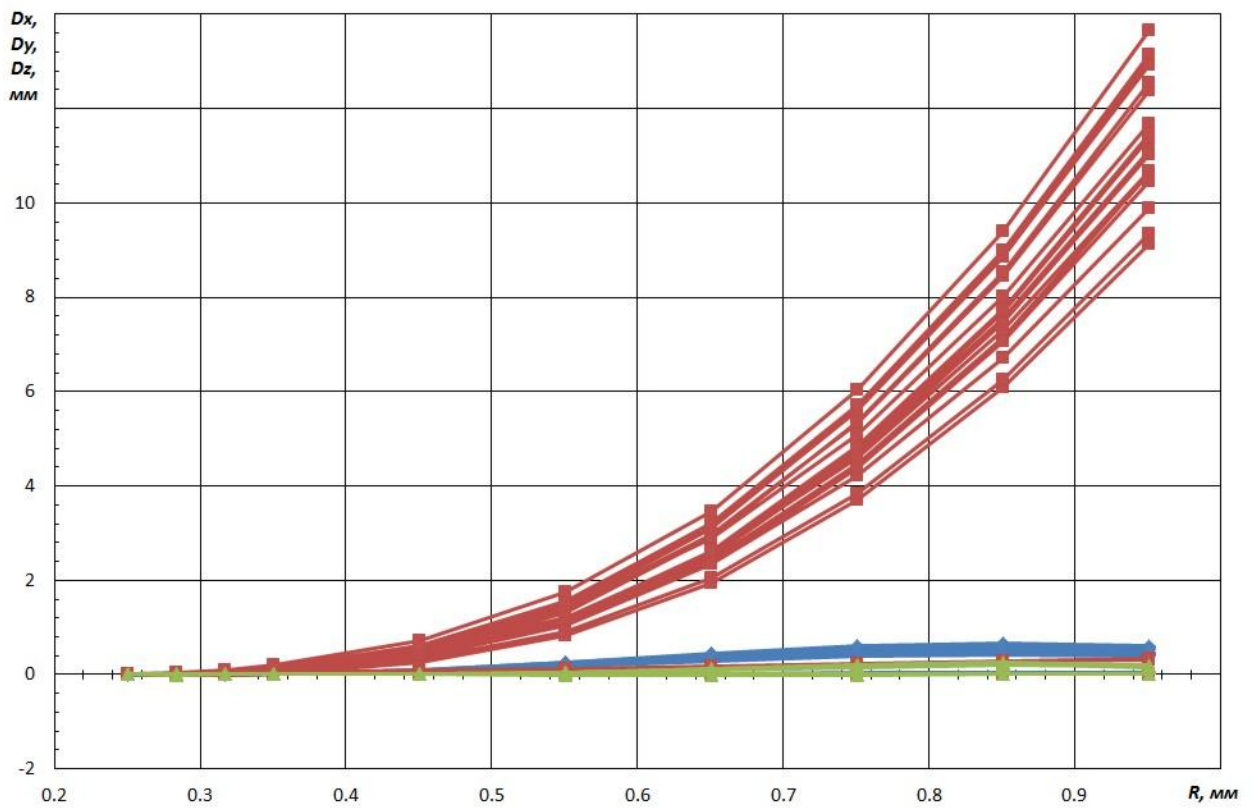


Рисунок 5 Поступательные смещения сечений по трем координатам

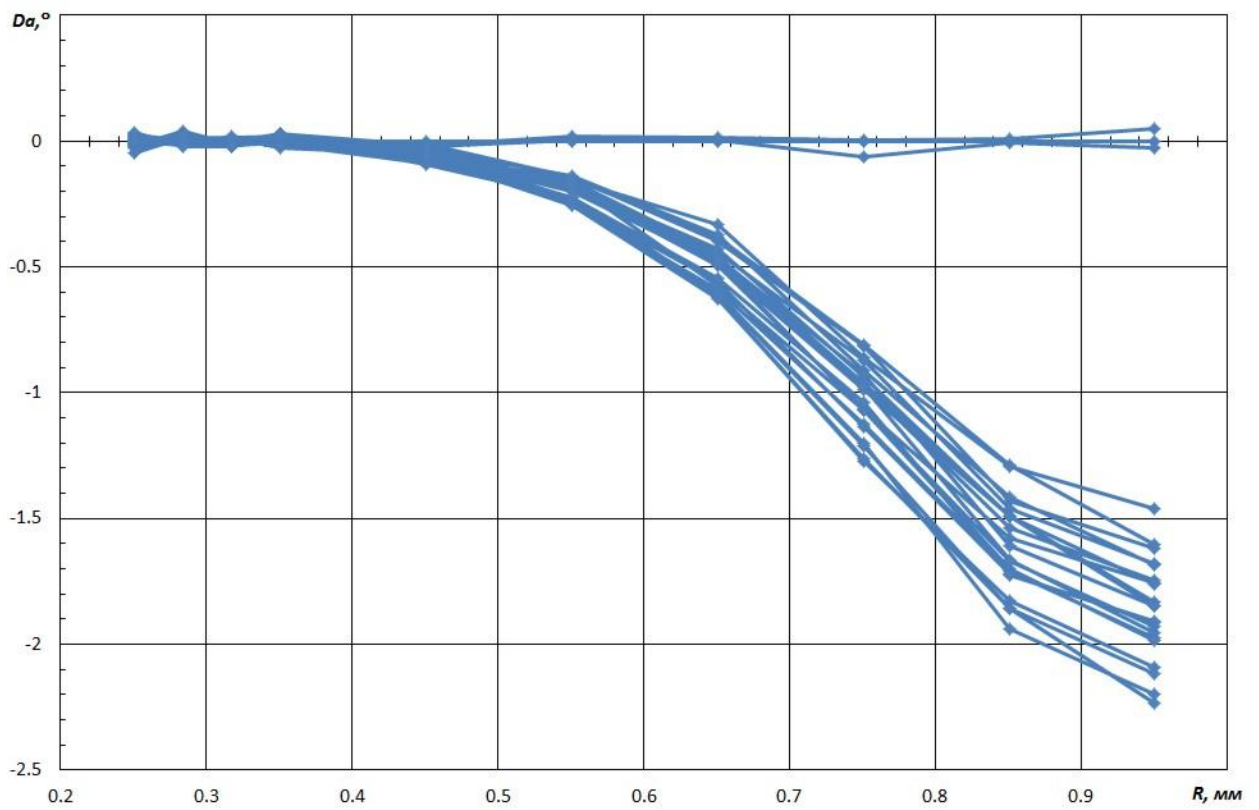


Рисунок 6 Угловые смещения сечений по трем координатам