

Конкурсная работа

ТЕХНОЛОГИЯ ВИДЕОГРАММЕТРИИ ДЛЯ ЛЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (За создание новой технологии)

Кулеш В.П., Курулюк К.А., Мошаров В.Е., Нонкин Г.Е., Сеньев И.В.
(ФАУ «ЦАГИ»)

Гусев П.Н., Матросов А.А. (ПАО «НПК «Иркут»)

Алексеев М.А. (ПАО «Ил»)

Задача измерения формы и деформации планера и элементов конструкции натурального летательного аппарата в наземных и летных испытаниях актуальна как с точки зрения проверки аэродинамических и прочностных расчетов, так и обеспечения безопасности полетов. Наиболее эффективным и информативным методом таких измерений в последнее время зарекомендовал себя бесконтактный оптический метод видеограмметрии (ВГМ), основанный на цифровой регистрации и численной обработке изображений [1].

Технология видеограмметрических исследований, разработанная в ЦАГИ, с успехом применяется как при наземных испытаниях прочности авиационных конструкций, так и при экспериментальных исследованиях аэродинамики и аэроупругости аэродинамических моделей разрабатываемых перспективных летательных аппаратов в аэродинамических трубах (АДТ) [2–6]. Однако результаты модельных исследований требуют подтверждения исследованиями натуральных авиационных конструкций. Применение метода ВГМ в наземных и летных испытаниях натуральных самолетов сталкивается с, казалось бы, неразрешимой проблемой определения точки отсчета [7]. На самолете нет заведомо неподвижных частей, и камеры, где бы они не были закреплены, будут перемещаться и относительно объекта измерения и относительно друг друга.

Целью настоящей работы являлось совершенствование технологии видеограмметрии для исследований движения и деформации элементов натуральных конструкций летательных аппаратов в наземных и летных испытаниях.

Задача была решена путем привлечения заранее известной сторонней информации о конструкции и кинематике движения исследуемого натурального объекта, сформулированной в

виде математической параметрической гипотезы и включенной в общую процедуру математической обработки результатов видеogramметрии.

1 Новая технология видеограмметрии

В общей постановке задача восстановления координат по одному изображению в видеограмметрии недоопределена, так как для трех неизвестных координат заданной точки в пространстве существуют только два уравнения, основанные на измеренных двух координатах точки в плоскости изображения. Существует два основных подхода к разрешению этой неопределенности. Первый – это принцип *стереограмметрии*, при котором производится регистрация двух цифровых изображений контролируемой поверхности одновременно двумя цифровыми камерами, а замыкание системы рабочих уравнений выполняется путем комбинации данных от двух изображений. Второй – принцип *монограмметрии*, при котором регистрируется только одно цифровое изображение одной камерой, а для замыкания системы уравнений привлекается дополнительная априорная информация, полученная из сторонних источников.

Априорной информацией может служить, в частности, заранее известные закономерности движения и деформации объекта или известная кинематика движения, обусловленная конструкцией. Такая дополнительная информация может быть получена заранее из чертежа, трехмерной CAD-модели или предварительных инструментальных измерений. На основании априорной информации математически формулируется *параметрическая гипотеза* формы, движения и деформации контролируемой поверхности объекта, которая, будучи дополненной к системе двух рабочих уравнений, замыкает ее и позволяет решить задачу определения искомых геометрических параметров объекта в пространстве (см. патенты ФАУ «ЦАГИ»: RU 2551396 «Способ бесконтактных измерений геометрических параметров объекта в пространстве и устройство для его осуществления» /06.11.2013/ [8]; RU 2749654 «Способ измерений координат точек объекта в пространстве» /28.10.2020/ [9]).

Разработанная в ЦАГИ новая технология видеограмметрии предполагает создание и использование *параметрической гипотезы*, не только в варианте *монограмметрии*, но и в

варианте *стереограмметрии*. Эта процедура позволяет дополнительно, во-первых, обобщить результаты измерений координат множестве точек на контролируемой поверхности, свести их к обобщенным параметрам перемещения объекта как целого и его деформации изгиба и кручения, а во-вторых, исключить влияние неконтролируемых перемещений цифровых камер в процессе измерений.

Разработанная в ЦАГИ новая технология видеограмметрии была с успехом применена в двух экспериментах:

- в наземных «горячих» испытаниях силовой установки натурального турбовинтового пассажирского самолета для бесконтактного панорамного измерения параметров движения и деформации лопастей шестилопастного воздушного винта и
- в летных испытаниях натурального магистрального пассажирского самолета для измерения параметров деформации консоли композитного крыла и движения элементов механизации на всех режимах полета.

2 Измерение параметров движения и деформации лопастей воздушного винта

Измерение параметров движения и деформации лопастей воздушных винтов является одной из важных задач в промышленном аэродинамическом эксперименте. Под действием аэродинамических и инерционных нагрузок лопасти винта самолета совершают сложное пространственное движение со многими степенями свободы, которое включает вращение по азимуту, угловые движения, колебания, деформации изгиба и кручения. Изменение формы лопастей неизбежно приводит к ухудшению функциональных характеристик, экономичности и эффективности винтов. Наиболее нагруженным и сложным режимом работы винта является наземный режим взлета, когда реализуется максимальная тяга, и близость земной поверхности определяет переменную по азимуту нагрузку лопастей.

Сложность движения лопасти воздушного винта обусловила выбор принципа *стереограмметрии* для построения оптической схемы видеogramметрической измерительной системы (ВГМ-системы). В этой части работы была создана стереограмметрическая установка с двумя скоростными камерами, отработана методика калибровки ВГМ-системы, проведения испытаний, разработка новых алгоритмов обработки экспериментальных данных. Измерительная система была смонтирована на взлетной полосе на расстоянии около 10 м перед самолетом (рис. 1). Для работы в полевых условиях более подходят малогабаритные мобильные компьютеры, поэтому сбор и накопления изображений с каждой камеры был организован с помощью отдельного ноутбука. Передача информации от камер осуществлялась по каналу Ethernet (GigE), обеспечивающему передачу изображений компьютеру по кабелям длиной 35 и 40 м. управление измерениями производилось от одного из компьютеров. Камеры и ведущий компьютер были охвачены локальной системой синхронизации, обеспечивавшей заданную частоту и строгую одновременность регистрации изображений двумя камерами.

Методом видеogramметрии испытывались винты силовой установки натурального турбовинтового пассажирского самолета на гоночной площадке на земле на всех режимах, в

том числе на максимально нагруженных режимах взлета. Винты имели шесть лопастей, диаметр винта равнялся 3900 мм, скорость вращения составляла 1200 об/мин.



а



б

Рис.1 Препарированный винт (а) и готовая к работе ВГМ-система (б)

Измерениям методом видеограмметрии были подвержены все шесть лопастей сначала винта левого двигателя, а затем лопасти №№ 1 и 4 правого. На каждой исследуемой лопасти по одинаковой схеме были нанесены группы по 24 контрольных маркера (рис. 1а). Еще один маркер был нанесен на коке на оси вращения. Этот маркер был общим для всех лопастей и обеспечивал совмещение локальных систем координат всех лопастей. Поэтому расчетная сетка маркеров каждой лопасти содержала 25 контролируемых точек (точек измерения). Маркеры были выполнены из самоклеящейся световозвращающей пленки и имели диаметр 30 мм. Для повышения контрастности изображений маркеров испытания проводились в темное время суток, а освещение обеспечивалось специальными сосредоточенными источниками света (рис. 1б).

Для калибровки ВГМ-системы была разработана оригинальная методика, основанная на регистрации изображений винта в полном диапазоне угла вращения на малой скорости не более 10% от нормальной.

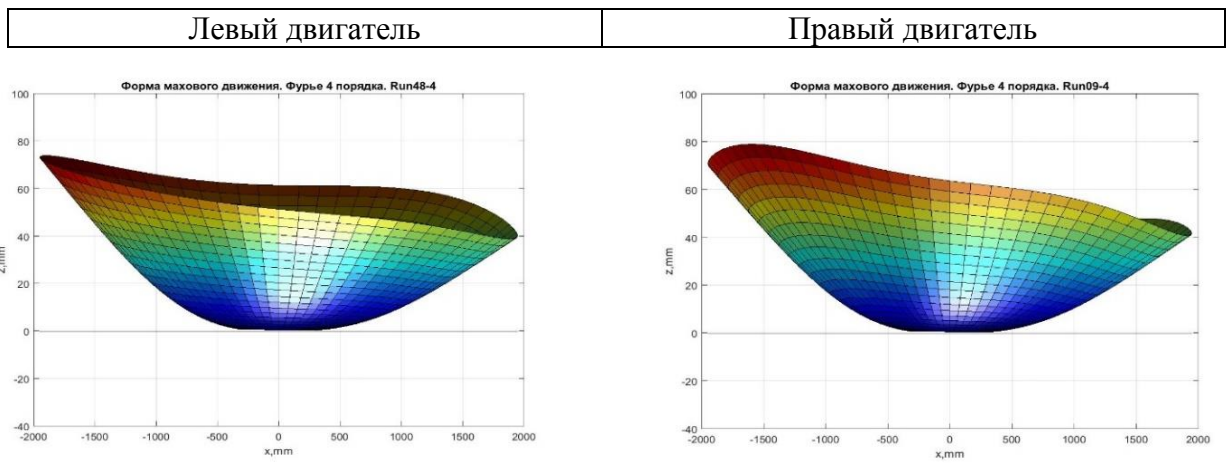
На стационарных режимах испытаний снималось по 1000 отсчетов с частотой 1000 кадров в секунду (продолжительность 1 секунда), что позволило вычислять спектр колебаний в диапазоне до 500 Гц. Всего было выполнено 67 серий измерений, содержащих

67000 отсчетов. На динамических режимах получено 13 серий стереопар по 31тысяче отсчетов в каждой (продолжительность 31 с) – всего 403 тысячи отсчетов. На втором этапе испытаний поочередно исследовалась работа винтов левого и двигателя на стационарных режимах.

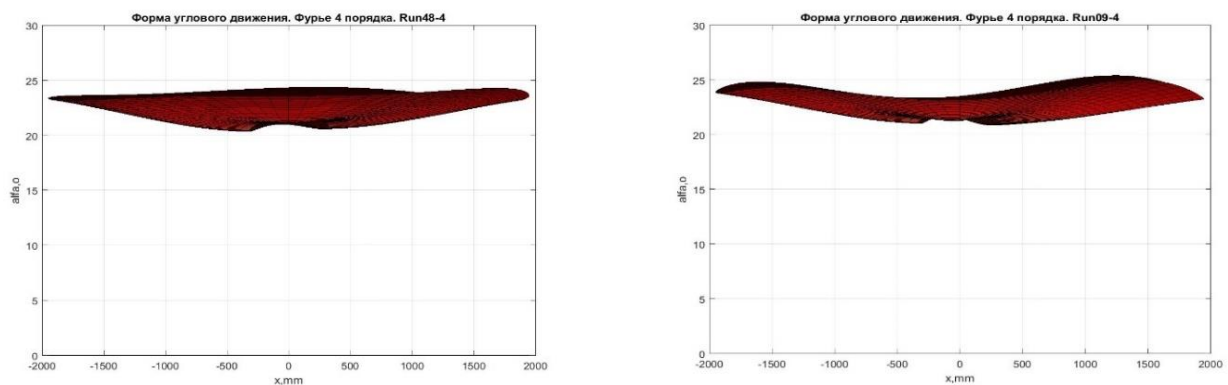
По итогам данной работы были получены результаты панорамных (в полном диапазоне угла вращения винта) измерений форм деформации изгиба и кручения на различных режимах, а также спектры колебаний лопастей вращающихся винтов двигателя самолета. В качестве иллюстрации на рис. 2 представлены формы махового (а) и углового (б) движения лопасти №4 на двух двигателях на нормальном взлетном режиме (НВЗЛ). Были отмечены влияния на формы движения лопастей близость земли и фюзеляжа, положения закрылков, а также одного двигателя на другой.

На рис. 3 представлены спектры угловых колебаний лопасти № 1 в корневом и концевом сечении, а также колебательного движения винта как целого вдоль оси вращения (z) на режиме земного малого газа (ЗМГ). При этом на некоторых режимах работы винта наблюдались угловые колебания лопастей с частотами, не кратными основной частоте вращения винта (частота вращения винта составляла 20 Гц).

Были исследованы также переходные процессы при смене режимов работы двигателей. На рис. 4 приведен пример результатов измерений динамики движения лопасти при переходе двигателя из режима нормального взлета (НВЗЛ) в режим полетного малого газа (ПМГ).



а) маховое движение лопасти



б) угловое движение лопасти

Рис. 2 Формы деформации изгиба (а) и кручения (б) лопасти №4 двух винтов на режиме взлета

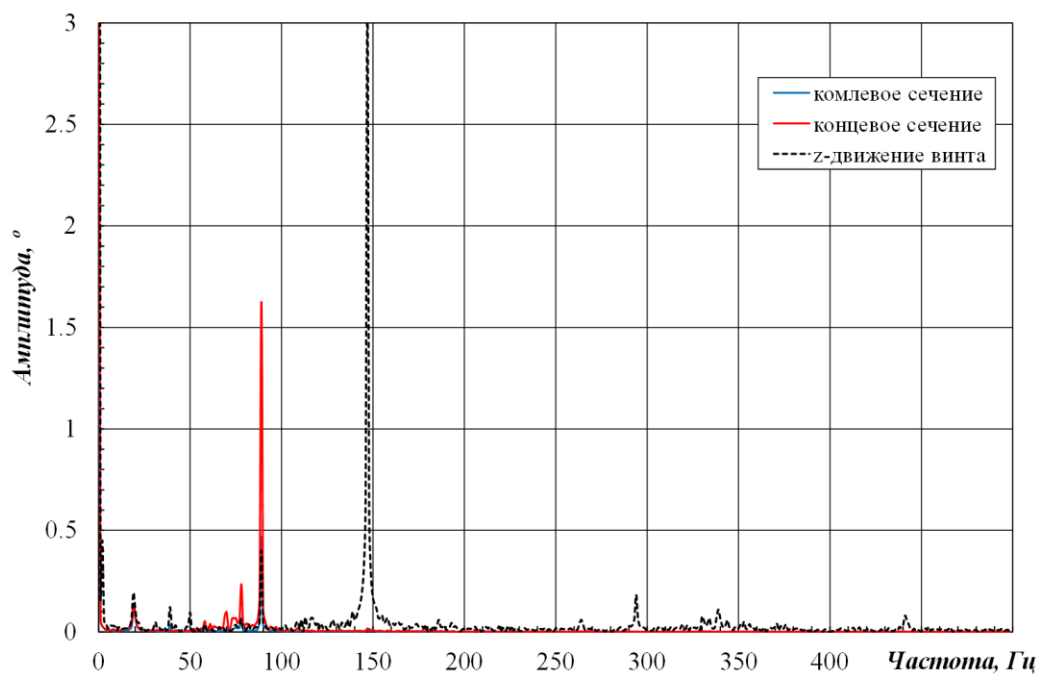
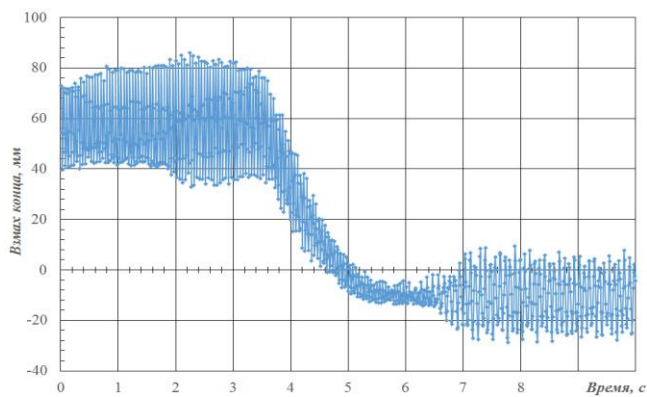
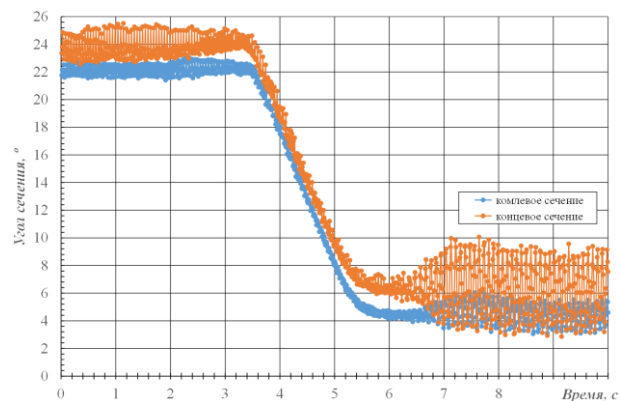


Рис.3 Спектр угловых колебаний лопасти №1 на режиме земного малого газа



а) маховое движение конца лопасти



б) угловое движение лопасти

Рис.4 Исследование переходного процесса из режима НВЗЛ в ПМГ

Основным результатом этой части работы явились детальные панорамные измерения методом видеограмметрии форм деформации изгиба и кручения, а также спектра колебаний лопастей на разных режимах работы винтов турбовинтового пассажирского самолета на стоянке в натуральных условиях взлетной полосы аэродрома. Показана возможность измерений координат мгновенного положения точек поверхности лопасти с погрешностью, не превышающей 1,5 мм на всем диске вращения и спектра частот колебаний лопасти до 500 Гц.

3 Измерения параметров деформации крыла и движения механизации самолета в полете

Объектом исследований являлась левая консоль пассажирского магистрального самолета и ее органы управления: элерон, интерцепторы и закрылки. Полуразмах крыла самолета составлял 18 м, угол стреловидности $\vartheta=25^\circ$ и угол v -образности $v=5^\circ$.

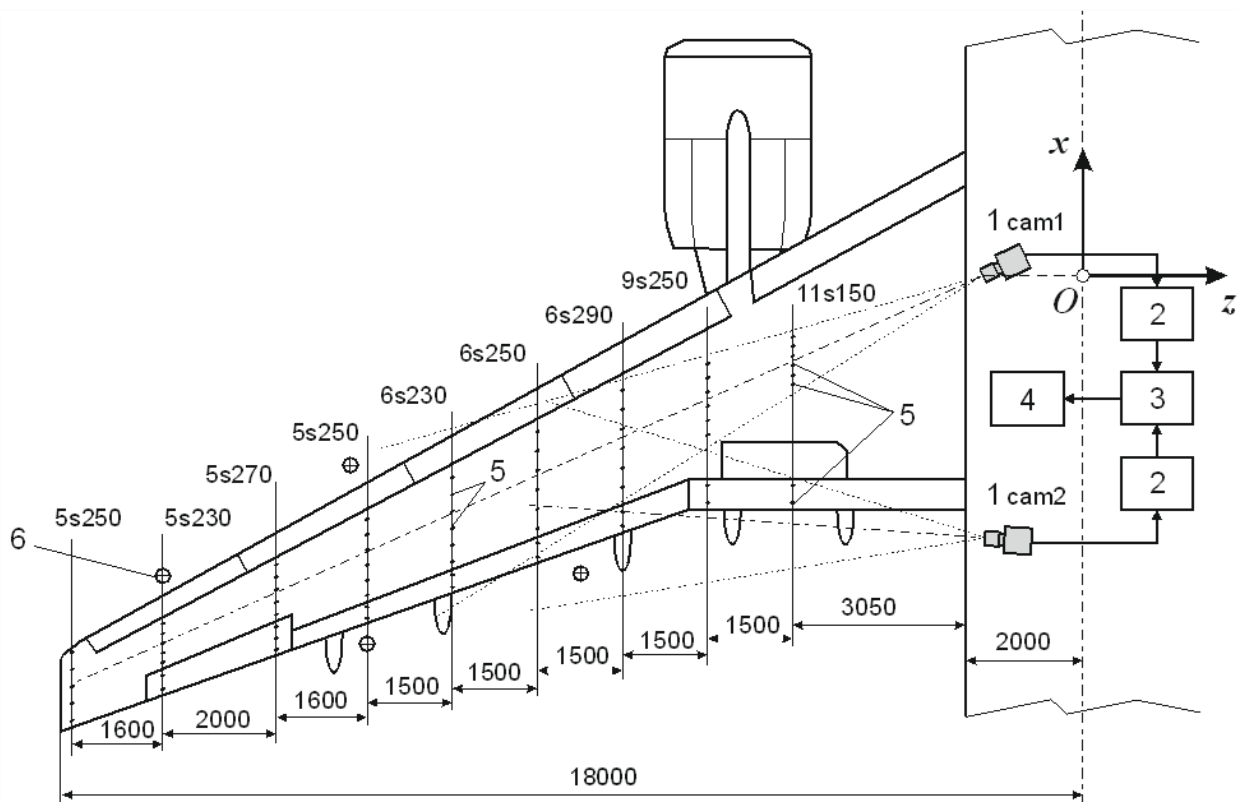


Рис.5 Структурно-композиционная схема бортовой видеogramметрической системы

Была разработана специальная видеogramметрическая система на основе принципа *моногограмметрии*, содержащая два отдельных ВГМ-канала, один из которых был предназначен для измерения параметров деформации консоли, интерцепторов и элерона, а другой – для измерения параметров движения закрылков. Видеogramметрические каналы бортовой системы включали две одинаковые цифровые камеры (1) cam1 и cam2 высокого разрешения (11 Мпикс) с размером матрицы 4037×2692 пикс, оснащенные одинаковыми приемными объективами с фокусным расстоянием $F = 50$ мм, контроллер камер (2), сетевой коммутатор (3), компьютер (ноутбук) (4) и набор маркерных меток (маркеров) (5). Камеры

были жестко закреплены по левому борту напротив выбранных иллюминаторов к смежным шпангоутам фюзеляжа с помощью специальной рамы из монтажного алюминиевого профиля (рис.6).

На поверхность консоли и органов управления были нанесены две сетки маркеров, расположенных в 14 сечениях, параллельных плоскости симметрии самолета. Сетка для камеры cam1 содержала 115 маркеров, расположенных в 11 (с 1 по 14, за исключением сечений 2, 4, 9) сечениях, а для камеры cam2 – 81 маркер в 9 сечениях (с 1 по 9 сечение). Маркеры были изготовлены из черной бархатной самоклеящейся бумаги в форме эллипсов и наклеены на белую поверхность крыла так, чтобы большая ось эллипса была направлена на камеру (рис.6б). Размеры маркеров были рассчитаны такими, чтобы на изображении они образовали пятна в форме круга с приблизительно одинаковыми размерами. В дальнейшем, четырнадцатом, сечении эллипсы имели размеры 250×28 мм, а в ближнем, первом, 12×5 мм.



а



б

Рис.6 Установка камер в салоне самолета (а) и нанесение маркеров на контролируемую поверхность крыла (б)

Калибровка обоих каналов бортовой видеограмметрической системы была выполнена в два этапа. Первый этап проводился в лабораторных условиях с применением точных средств калибровки. По его результатам были определены фотограмметрические параметры внутреннего ориентирования камер и оценена инструментальная погрешность ВГМ-каналов величиной 0,06 мм/м. Второй этап выполнялся в условиях ангара при полностью смонтированной и настроенной измерительной системе с использованием мобильных средств калибровки – тест-реек, которые с помощью отвесов подвешивались вертикально в 8 заданных положениях вблизи передней и задней кромок крыла. Этот этап обеспечил привязку измерительной системы координат к объекту измерений.

Планом эксперимента были предусмотрены пробные наземные измерения и зачетные измерения в двух полетах. Целью пробных наземных измерений была проверка работоспособности измерительной ВГМ-системы. Были выполнены измерения деформации консоли крыла при ее двунаправленном нагружении с помощью двух гидравлических силовозбудителей, а также измерения параметров движения закрылков при их выпуске. Для исключения влияния перемещения самолета как целого вблизи крыла были установлены неподвижно четыре тест-рейки, к которым при обработке результатов привязывалась местная измерительная система координат. На рис.7 приведен график координат $\{x,y\}$ маркеров неподвижных тест-реек и поверхности консоли в исходном состоянии и при максимальных нагрузках вверх и вниз. Максимальная стрела прогиба на конце консоли составила ± 80 мм, что соответствовало величине хода поршней силовозбудителей.

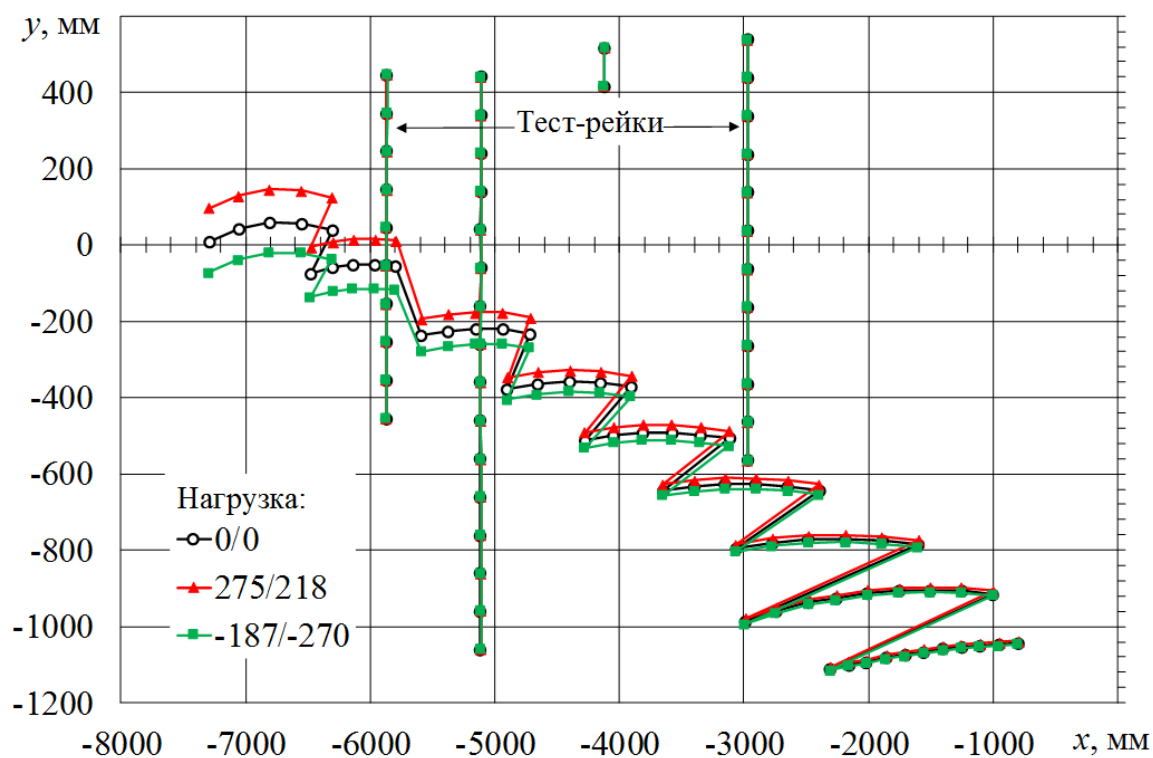


Рис.7 Координаты маркеров в при нулевой и максимальной нагрузке вверх и вниз

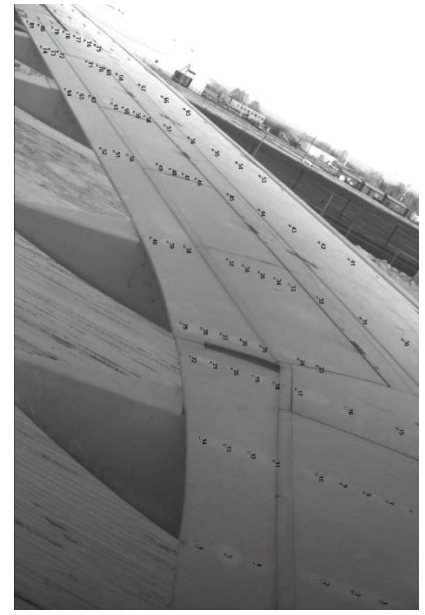
В двух полетах были выполнены серии отсчетов (в первом около 400, а во втором около 1000) на заданных режимах полета. На рис. 8 приведены примеры зарегистрированных на взлете рабочих цифровых изображений с камер cam1 и cam2 с расставленной нумерацией маркеров. В первом полете произведены измерения на 42 режимах (около 400 отсчетов), а во втором на 106 режимах полета (около 1000 отсчетов), включая режимы взлета, крейсерского полета и посадки.

На рис. 9 показаны графики результатов измерения параметров деформации изгиба и кручения консоли по размаху в полете на крейсерском режиме относительно положения на земле.

На рис.10 приведены результаты измерений в течение всего полета углового движения элерона (а) и закрылков в 5 сечениях (б)

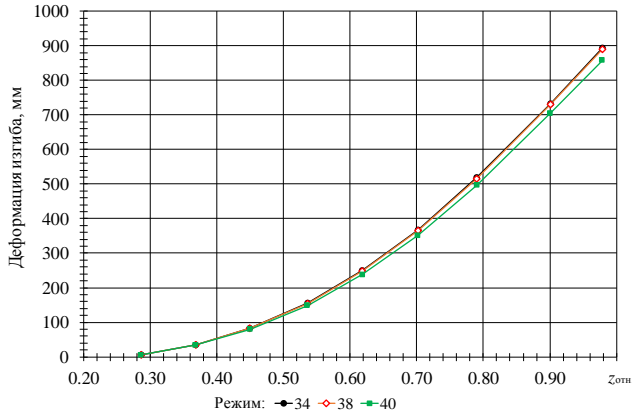


cam1

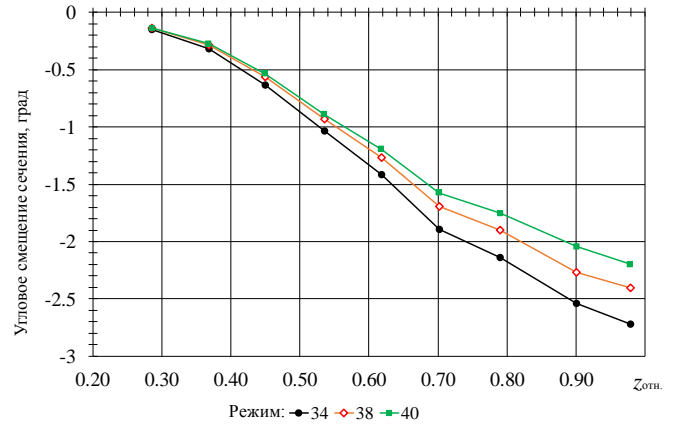


cam2

Рис.8 Рабочие цифровые изображения ВГМ-каналов cam1 и cam2 в процессе обработки

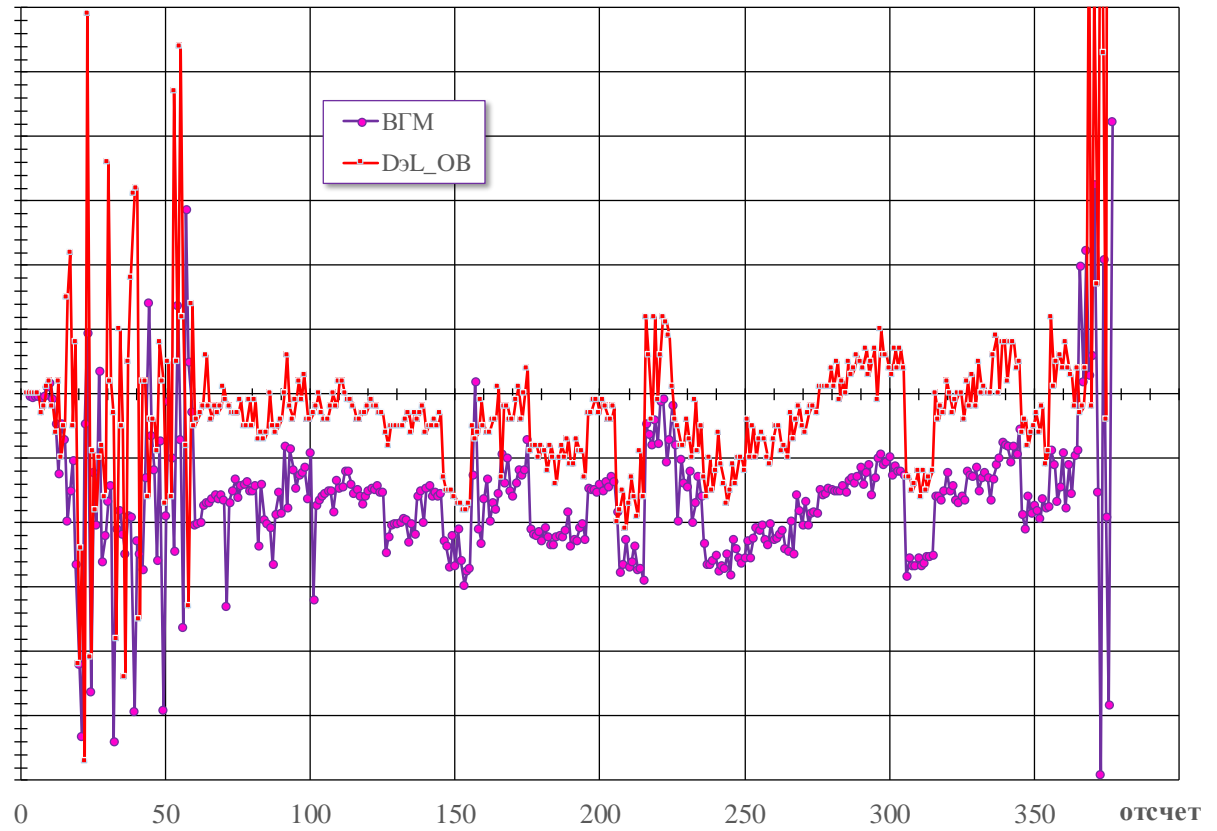


а

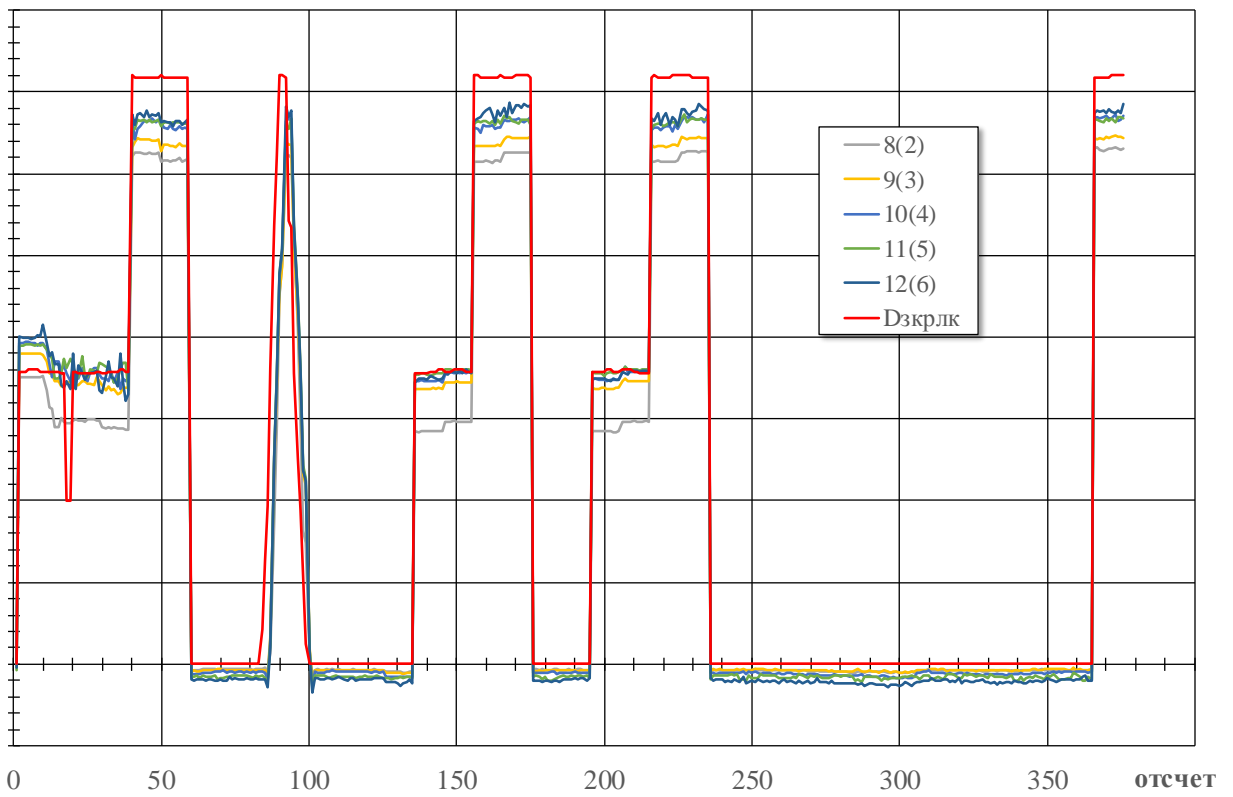


б

Рис.9 Графики деформации изгиба (а) и кручения (б) консоли при полете на крейсерском режиме



а



б

Рис.10 Диаграмма по номеру отсчетов углового движения элерона (а)
и закрылков (б)

В результате обработки полетной информации определены следующие параметры:

1. Стрела прогиба консоли крыла на крейсерских режимах полета;
2. Крутка по размаху крыла на крейсерских режимах полета;
3. Значения отжимания скоростным воздушным напором элерона, интерцепторов и закрылков от исходного положения на крейсерском режиме полета;
4. Изменения угла выпущенных закрылков в посадочной конфигурации.

Полученные результаты дают хорошее совпадение измеренных и расчетных параметров.

В совокупности, внедрение усовершенствованной технологии ВГМ в летный эксперимент позволит не только довести аэродинамические и прочностные характеристики самолета, но и послужит средством валидации тубного эксперимента через сопоставление результатов с результатами летного эксперимента.

Сейчас ведется подготовка новой технологии ВГМ к измерениям параметров деформации консоли крыла и движения органов управления самолета RRJ-New и лопастей вентилятора авиационного двигателя ПД-14.

4 Список публикаций

- 1 В.П.Кулеш. Особенности применения видеogramметрии в экспериментальной аэродинамике. - Измерительная техника, 2018,11, сс.34-39.
- 2 С.И. Иншаков, В.П. Кулеш, В.Е. Мошаров, В.Н. Радченко. Видеogramметрический метод бесконтактных измерений мгновенной деформации лопастей вращающихся воздушных винтов. // Ученые записки ЦАГИ, 2013, т. XLIV, № 4, сс.72-79.
- 3 В.П. Кулеш, Н.Н. Тарасов, Г.Е. Швардыгулов, П.А. Шумейко. Измерения параметров движения и деформации лопасти несущего винта вертолета методом стереogramметрии. // Ученые записки ЦАГИ, 2021, т. LII, № 5, сс.77-86.
- 4 В.П. Кулеш. Измерения деформации адаптивной носовой части крыла в потоке аэродинамической трубы методом видеogramметрии. // Ученые записки ЦАГИ, 2014, т. XLV, № 6. сс.100-109.
- 5 В.П.Кулеш, К.А.Курулюк, М.А.Федотов. Бесконтактные измерения деформации кессона крыла при прочностных испытаниях методом видеogramметрии. // Ученые записки ЦАГИ, 2017, т. XLVIII, №8, сс.54-62.
- 6 В.П.Кулеш, К.А.Курулюк, Г.Е.Швардыгулов. Бесконтактные измерения геометрических параметров деформации крыла модели самолета в потоке аэродинамической трубы Т-128 ЦАГИ // Ученые записки ЦАГИ, 2022, т. LIII, 4, сс. 52–61.
- 7 В.П. Кулеш. Измерения деформации крыла пассажирского самолета в полете методом видеogramметрии. - Ученые записки ЦАГИ, 2015, т. XLVI, 2. Сс.54-62
- 8 «Способ бесконтактных измерений геометрических параметров объекта в пространстве и устройство для его осуществления», автор В.П. Кулеш. // Патент РФ № 2551396, МПК G01B 11/16, 2013, бюл. № 14, 2015.
- 9 «Способ измерения координат точек в пространстве», авторы В.П.Кулеш, Г.Е.Швардыгулов // Патент РФ на изобретение № 2749654, МПК G01B 11/16, 2020, бюл.№ 17, 2021.