

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ВИДЕОГРАММЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ НОРМАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПАНЕЛИ ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА

Бусарова М.В. \*, Желонкин С.В. \*\*, Кулеш В.П. \*, Курулюк К.А. \*\*\*

*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского,  
ЦАГИ, ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия*

*\* e-mail: mera@tsagi.ru*

*\*\* e-mail: zhelonkin00@gmail.com*

*\*\*\* e-mail: ksusha\_kp\_13@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 19.02.2020

Важной составной частью испытаний панелей фюзеляжа самолета на усталость и живучесть является изучение полей нормальной деформации выпучивания и коробления обшивки. В статье приведено описание оптического метода видеограмметрии и применения его для бесконтактных измерений распределенных нормальных деформаций панелей фюзеляжа пассажирского самолета при проведении испытаний панелей на внутреннее избыточное давление.

*Ключевые слова:* бесконтактные измерения, видеограмметрический метод, нормальные деформации, поля деформации, разрушение конструкции.

### Введение

Прочность, надежность и ресурс современных летательных аппаратов обеспечиваются многосторонними экспериментальными исследованиями поведения элементов конструкции при штатных и экстремальных внешних воздействиях [1]. Одним из видов таких испытаний является изучение деформации панелей фюзеляжа самолета под действием внутреннего избыточного давления. При этом значительную составляющую деформации имеют смещения точек в направлении нормали к поверхности, т.е. нормальная деформация. Эти деформации имеют сложный распределенный по поверхности характер. Для получения полной картины распределенной нормальной деформации необходимы измерения в большом числе точек. Традиционным методом измерения деформации является метод тензометрии [2]. Однако при исследовании сложных полей деформации методами тензометрии возникают трудности с размещением датчиков и интерпретацией результатов тензометрии, поскольку неизвестна картина распределения узловых и критических точек.

Перспективным направлением измерений распределенных деформаций в последнее время за-

рекомендовал себя бесконтактный оптический метод видеограмметрии (ВГМ) [3–6]. Результатом измерений являются не относительная деформация, а непосредственно величины перемещений точек поверхности по нормали [7, 8]. Это дает дополнительное преимущество при интерпретации результатов и сопоставлении их с расчетом или математической моделью коробления, выпучивания обшивки [9, 10].

Целью настоящей работы являлось совершенствование бесконтактного оптического метода видеограмметрии для измерений распределенных нормальных деформаций в большом числе точек поверхности и применение его при испытаниях панелей фюзеляжа самолета на внутреннее избыточное давление.

Для измерений был выбран метод видеограмметрии с использованием одной цифровой камеры (метод монограмметрии) [11–15]. Этот выбор был обусловлен стесненностью пространства вокруг испытываемой панели на экспериментальной установке.

## Метод видеogramметрии

Суть метода видеogramметрии состоит в определении трех координат  $x, y, z$  точки объекта в пространстве по двум координатам  $u, v$  отклика этой точки на цифровом изображении [16–19]. Формально имеются только два уравнения для трех неизвестных:

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

где  $u_0, v_0$  — координаты центра изображения, т.е. точки пересечения оптической оси приемного объектива с плоскостью чувствительной матрицы цифровой камеры;

$w_0$  — задний отрезок приемного объектива;

$x_0, y_0, z_0$  — координаты центра приемного объектива (центра проекции) в системе координат объекта;

$M_{ij}$  — элементы матрицы вращения, являющиеся функциями углов ориентации  $\alpha, \beta$  и  $\gamma$  системы координат камеры в системе координат объекта [20].

Группу параметров  $\{x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma\}$  принято называть фотограмметрическими параметрами внешнего ориентирования, а  $\{u_0, v_0, w_0\}$  — параметрами внутреннего ориентирования. К параметрам внутреннего ориентирования относят также параметры, учитывающие геометрические искажения изображения, вносимые несовершенствами приемного объектива. В данной работе учитывается только радиальная дисторсия второго порядка, при которой искажения можно компенсировать по формулам:

$$\begin{cases} u - u_0 = (u' - u_0) \left( 1 - d \frac{r^2}{w_0^2} \right); \\ v - v_0 = (v' - v_0) \left( 1 - d \frac{r^2}{w_0^2} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где  $u', v'$  — координаты искаженного изображения;  $u, v$  — исправленные координаты изображения;  $d$  — безразмерный коэффициент дисторсии;  $r^2 = (u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2$ .

В мировой практике для разрешения неопределенности задачи восстановления координат

обычно применяют метод стереометрии [21–25], при котором получают два изображения поверхности исследуемого объекта с помощью двух камер, находящихся на расстоянии, соизмеримом с расстоянием до объекта [26]. Комбинируя данные, полученные из двух таких изображений, замыкают рабочую систему уравнений. Однако в условиях реальных экспериментальных установок и стендов, характеризующихся стесненным пространством, ограниченным оптическим доступом и затруднениями в прокладке коммуникаций, не всегда имеется возможность размещения двух камер в нужных точках.

В методе монограмметрии, примененном в данной работе, для разрешения неопределенности задачи восстановления координат и замыкания системы уравнений используется априорная информация об исследуемом объекте. Предположим, что смещения точек по одной из трех координатных осей много меньше смещений по двум другим и этими смещениями можно пренебречь. Тогда, выбрав это направление в качестве координатной оси  $Oz$ , в уравнениях (1) можно положить  $z = \text{const}$ . И решить систему для точек с заданной координатой  $z$ .

## Объект исследований

Большая часть элементов конструкции самолета (фюзеляжа, крыла и др.) представляют собой плоские или цилиндрические с малой кривизной типовые панели. Объектом настоящих исследований стала типовая цилиндрическая панель фюзеляжа пассажирского самолета. Силовой набор панели включает в себя пять шпангоутов и семь стрингеров (рис. 1). Объект имеет характерные размеры: 2560 мм вдоль оси и 1530 мм по ширине. На экспериментальном стенде панель располагалась вертикально (рис. 2). При испытаниях задавалось избыточное давление под обшивкой и поперечная нагрузка компенсирующего растяжения. В вертикальном направлении нагрузка не

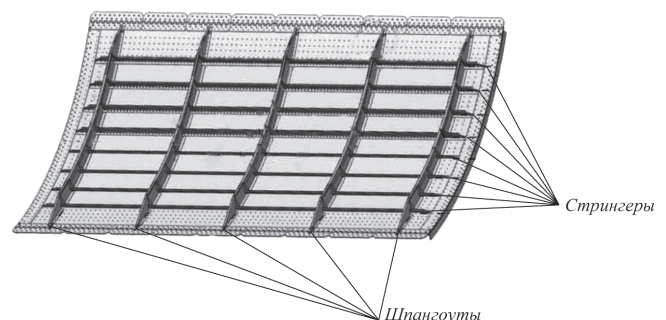


Рис. 1. Силовой набор панели



Рис. 2. Вид поверхности панели фюзеляжа в процессе подготовки к испытаниям

прилагалась, поэтому деформация в этом направлении должна быть минимальной.

Зададим измерительную систему координат, такую, в которой ось  $Oz$  направлена вертикально вверх параллельно оси цилиндрической поверхности, ось  $Oy$  направлена по средней нормали к поверхности, с началом  $O$  в середине области измерений.

Для реализации метода видеограмметрии на исследуемую поверхность был нанесен набор маркеров, расположенных в узлах регулярной прямоугольной сетки по сечениям, перпендикулярным оси  $Oz$ . Измеренные при разметке сетки координаты  $x$  и  $y$  маркеров служили координатами точек измерений, а координата  $z$  являлась априорной информацией для замыкания системы уравнений (1) в методе монограмметрии.

Численные значения параметров внутреннего ориентирования, включая коэффициент дисторсии, были найдены заблаговременно калибровкой камеры в лабораторных условиях. Значения параметров внешнего ориентирования определялись в ходе эксперимента методом автокалибровки, в котором в качестве тест-объекта принималась группа базовых маркеров по периметру нанесенной сетки маркеров в предположении, что эта область поверхности деформируется пренебрежимо мало.

#### Краткое описание методики измерений

Схема измерительной установки приведена на рис. 3,а. В измерительной системе применялась цифровая камера с КМОП-матрицей размером  $1/2,5''$  и разрешением  $2592 \times 1944$  пикселей (размер пикселя  $2,2$  мкм). В качестве приемного объектива применялся объектив с фокусным расстоянием  $16$  мм. Цифровая камера была установлена сверху на платформе приблизительно в вертикальной плоскости симметрии панели на высоте  $5265$  мм и на расстоянии  $3550$  мм по горизонтали от середины панели. Расстояние от объектива до середины панели составляло около  $6350$  мм, а угол оптической оси объектива к средней нормали к поверхности панели — около  $52^\circ$ . Вид узла камеры с осветителем показан на рис. 3,б. Для освещения применялась галогенная лампа с рефлектором мощностью  $50$  Вт. Регистрация изображений проводилась с помощью мобильного компьютера (ноутбука) по каналу USB-2.0.

Измерительные маркеры были размещены в девяти сечениях панели фюзеляжа с интервалом  $135$  мм по оси  $Oz$  (рис. 4). В каждом сечении симметрично оси  $Oz$  содержались  $35$  маркеров с переменным шагом: от  $35$  мм в середине до  $100$  мм к краям. Крайние маркеры были расположены на петлях, закрепляющих панель. Черные маркеры в форме эллипсов заранее рассчитанных размеров



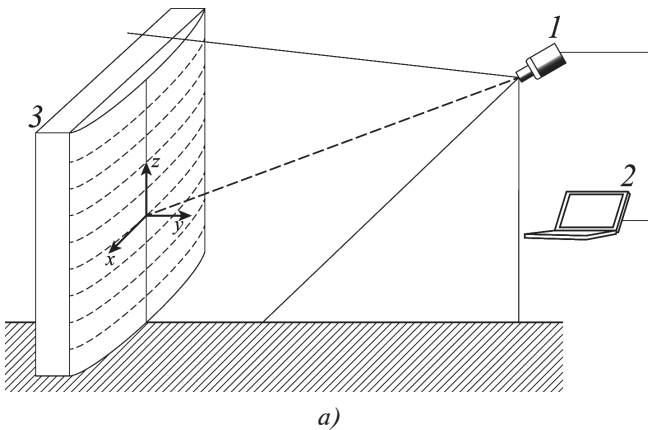


Рис. 3. Схема измерительной установки (а): 1 — камера; 2 — ПК для сбора данных; 3 — испытуемый объект; вид узла камеры (б)

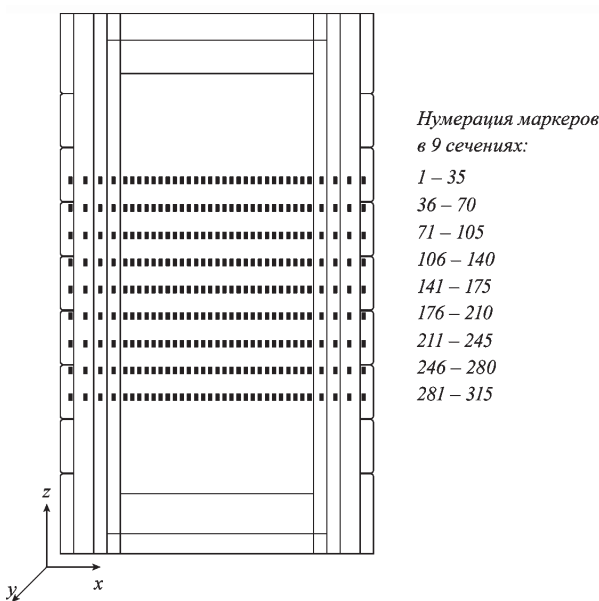


Рис. 4. Схема расположения измерительных маркеров

6×10 мм были напечатаны принтером на белой самоклеящейся бумаге, врезаны и наклеены в узлах размеченной сетки. Рабочее изображение поверхности панели фюзеляжа с нанесенными маркерами показано на рис. 5.

### Измерения деформации панелей фюзеляжа

Перед испытаниями была произведена калибровка настроенной видеogramметрической системы по маркерам на самой панели, координаты которых были измерены в ходе разметки сетки и нанесения маркеров. По результатам такой калибровки были найдены коэффициенты рабочей характеристики и установлено, что случайная погрешность (среднеквадратическое отклонение) измерений координат маркеров по осям

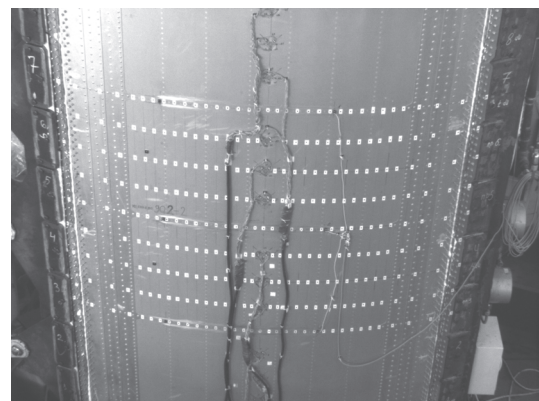


Рис. 5. Рабочее изображение с регистрирующей камеры в ходе испытаний

не превышала 0,1 мм. Эта величина может быть принята за инструментальную погрешность измерительной системы.

Программа измерений предусматривала измерения деформации панели фюзеляжа при положительном ступенчатом нагнетании избыточного давления воздуха внутри камеры, закрытой панелью, в диапазоне от 0 до 0,6 ати. Избыточное давление задавалась циклами «нагрузка-разгрузка» с размахом в 30, 60 и 100% от максимальной с характерным периодом 7 с. Циклограмма нагружения приведена на рис. 6.

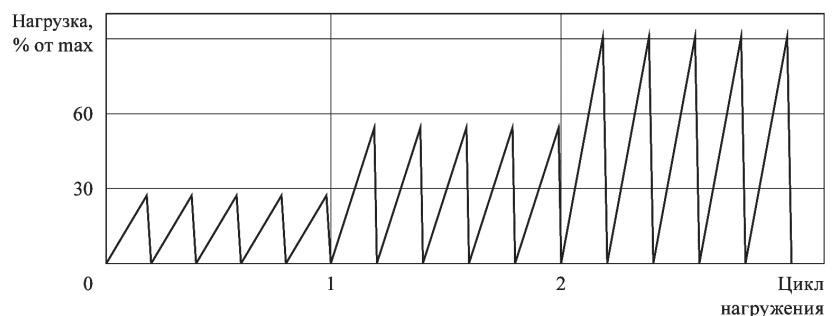


Рис. 6. Циклограмма нагружения в процентах от максимальной нагрузки

Рабочие изображения регистрировались непрерывно с частотой 6 кадров в секунду.

Первый этап обработки состоял в измерении координат  $u$  и  $w$  откликов маркеров на всех изображениях. Для этого использовалось специализированное программное обеспечение, с помощью которого маркеры на первом кадре из каждой серии расставлялись вручную, а на всех последующих – автоматически в пакетном режиме по шаблону, полученному на первом кадре.

На втором этапе обработки вычислялись координаты  $x$  и  $y$  всех маркеров в пространстве при условии  $z = \text{const}$ . Эта операция выполнялась с помощью другой специализированной программы с использованием полученных параметров рабочей характеристики. В программе обработки предусмотрено графическое трехмерное представление результатов измерений полей нормальной деформации обшивки. Примеры графического

представления полученных полей деформаций приведены на рис. 7.

### Результаты

Для анализа деформированного состояния панели были проанализированы деформации каждого из девяти измерительных сечений. Общий вид осредненной по сечениям деформации представлен на рис. 8. Общая картина геометрической формы панели должна быть подобной ненагруженной панели, но в силу неидеальных условий закрепления изменение формы панели отличается от деформации подобия.

Также были рассмотрены деформации вдоль стрингеров панели. По результатам анализа в середине панели между шпангоутами 2 и 4 была определена зона размером  $200 \times 1000$  мм с центром в середине, изменение геометрии обшивки в которой являлось достаточно равномерным. На

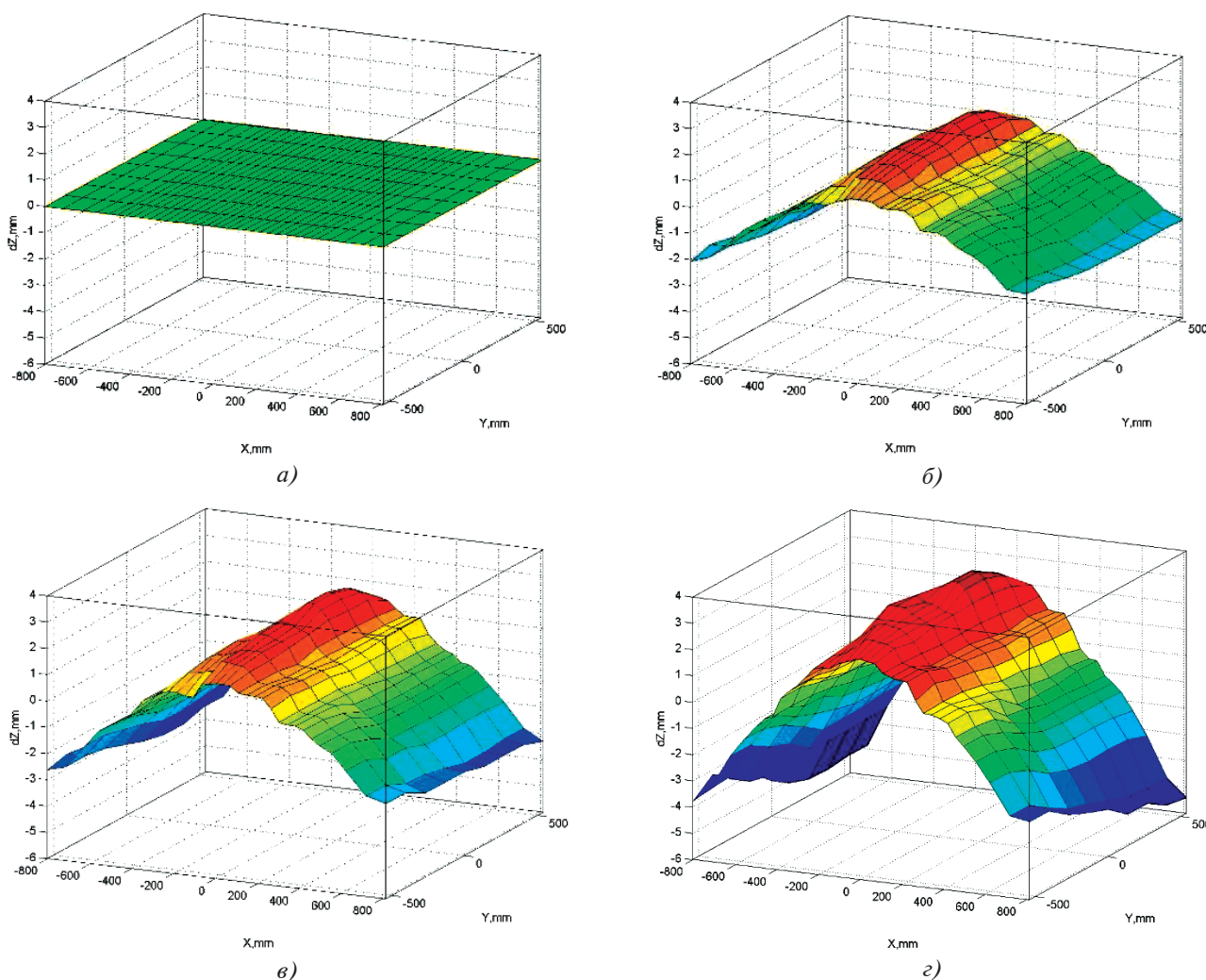


Рис. 7. Результаты измерений поля нормальной деформации панели:  $a - \Delta p = 0$ ;  $b - \Delta p = 30\%$ ;  $v - \Delta p = 60\%$ ;  $e - \Delta p = 100\%$

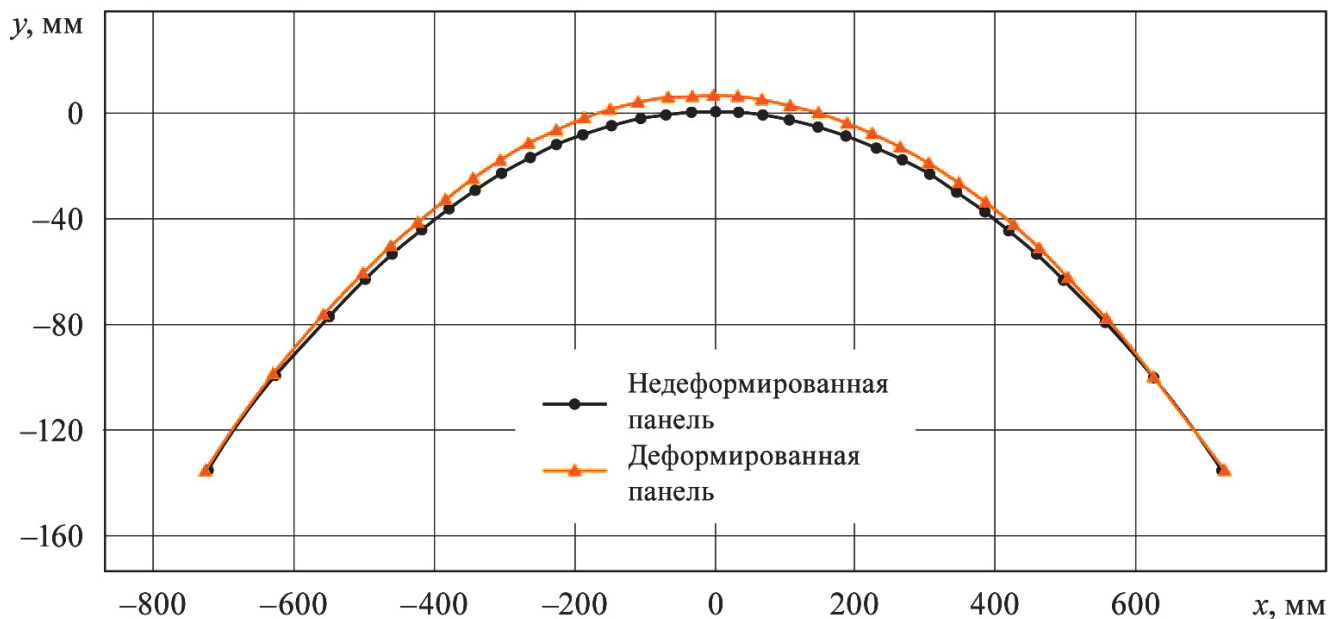


Рис. 8. Осредненная по сечениям форма панели в недеформированном и деформированном состояниях

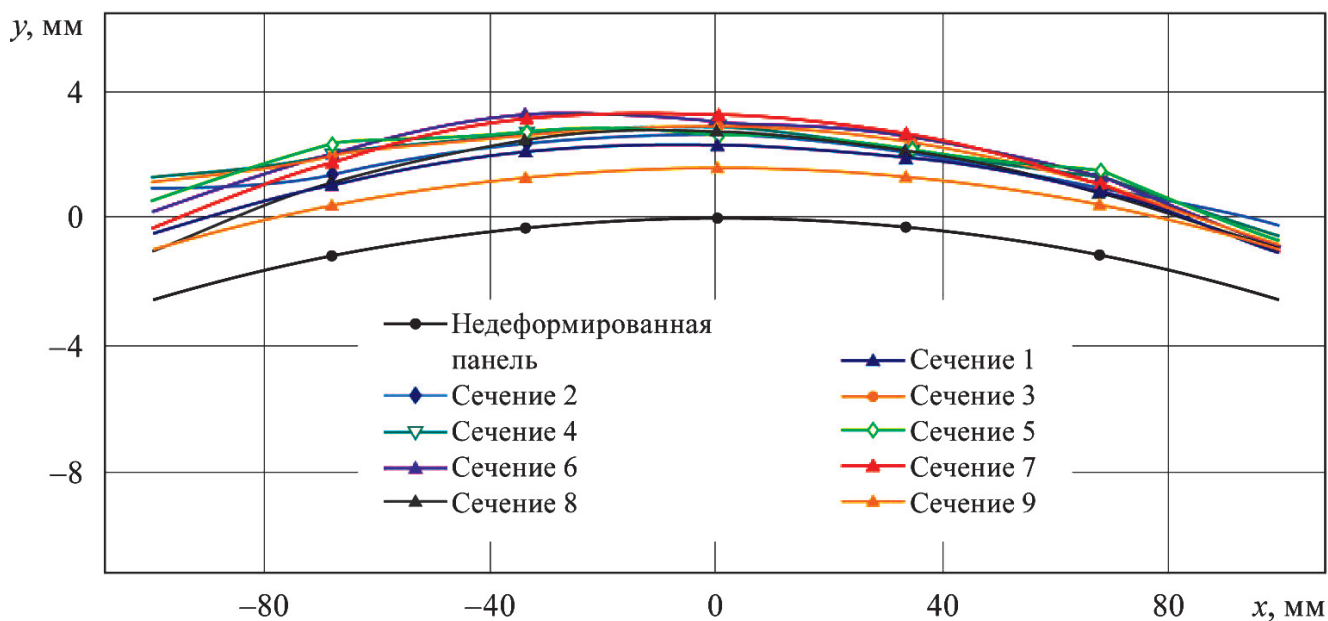


Рис. 9. Деформация измерительных сечений в рабочей зоне

рис. 9 показаны все деформированные сечения в данной зоне.

**Выводы**

Бесконтактный оптический метод видеограмметрии с использованием одной цифровой камеры (метод монограмметрии) адаптирован для измерения поля нормальной деформации поверхности типовых цилиндрических панелей фюзеляжа самолета.

Разрешение неопределенности задачи восстановления трех координат точек поверхности по

двум координатам точек изображения предложено осуществлять в предположении пренебрежимой малости смещений точек в направлении оси цилиндрической поверхности. Измеряемыми величинами являлись смещения точек по координатам в поперечных к оси сечениях.

При калибровке измерительной системы была получена среднеквадратическая оценка инструментальной погрешности, равная 0,1 мм.

Усовершенствованным методом видеограмметрии проведены измерения распределенной деформации типовой панели фюзеляжа пассажир-

ского самолета при циклическом изменении внутреннего избыточного давления. В результате эксперимента было получено, что максимальное смещение вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  составило не более 3 мм.

В дальнейшем для исследований усовершенствованным методом видеogramметрии динамики деформации панели в процессе наддува и снятия нагрузки рекомендуется использование более скоростной видеокамеры (скорость съемки не менее 30 кадров/с) и синхронизация ее с системой управления нагружением.

### Библиографический список

1. Баранов А.Н. Статические и теплопрочностные испытания летательных аппаратов. — М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2009. — 203 с.
2. Курулюк Д.В. Программное обеспечение для автоматизации проведения прочностных испытаний // Автоматизация в промышленности. 2017. № 4. С. 51-53.
3. Князь В.А. Оптическая система захвата движения для анализа и визуализации трехмерных процессов // ГРАФИКОН'2015: Сборник трудов Юбилейной 25-й Международной научной конференции (Протвино, 22-25 сентября 2015). — Протвино: Изд-во Института физико-технической информатики, 2015. С. 232–236.
4. Ahmadi F.F. Integration of industrial videogrammetry and artificial neural networks for monitoring and modeling the deformation or displacement of structures // Neural Computing & Applications. 2017. Vol. 28. No. 12, pp. 3709–3716. DOI: 10.1007/s00521-016-2255-2
5. Atkinson K.B. (ed.) Close Range Photogrammetry and Machine Vision. — Whittles Publishing, Scotland, UK, 2001. — 384 p.
6. Erickson G.E. Overview of Supersonic Aerodynamics Measurement Techniques in the NASA Langley Unitary Plan Wind Tunnel. — Technical Report NASA/TM-2007-214894. — NASA Center for AeroSpace Information, Hampton, Virginia, USA, 2007. — 107 p.
7. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. 2011. № 2. С. 92–100.
8. Black J.T., Pitcher N.A., Reeder M.F., Maple R.C. Videogrammetry dynamics measurements of a lightweight flexible wing in a wind tunnel // Journal of Aircraft. 2010. Vol. 47. No. 1, pp. 172-180. DOI: 10.2514/1.44545
9. Беспалов В.А., Гоцелюк Т.Б., Лазненко С.А., Матвеев К.А., Чаплыгин В.Н. Расчетная оценка коэффициентов интенсивности напряжения и длительности роста поверхностных трещин в типовых деталях сложной геометрии // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 4. С. 111-117.
10. Виноградов Ю.И., Гусев Ю.А., Золотухин В.С. Методы исследования концентрации напряжений в оболочках // Вестник Московского авиационного института. 2005. Т. 12. № 3. С. 61-65.
11. Burner A.W., Liu T., DeLoach R. Uncertainty of videogrammetric techniques used for aerodynamic testing // 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference (24–26 June 2002, St. Louis, Missouri). AIAA 2002-2794. DOI: 10.2514/6.2002-2794
12. Liu T., Cattafesta L.N., Radeztsky R., Burner A.W. Photogrammetry applied to wind-tunnel testing // AIAA Journal. 2000. Vol. 38. No. 6, pp. 964–971. DOI: 10.2514/2.1079
13. Liu T., Burner A.W., Jones T.W., Barrows D.A. Photogrammetric techniques for aerospace applications // Progress in Aerospace Sciences. 2012. Vol. 54, pp. 1-58. DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.03.002
14. Burner A.W., Liu T. Videogrammetric model deformation measurement technique // Journal of Aircraft. 2001. Vol. 38. No. 4, pp. 745–754. DOI: 10.2514/2.2826
15. Burner A.W., Radeztsky R.H., Liu T. Videometric applications in wind tunnels // The International Society for Optical Engineering (SPIE— 1997, San Diego, California). 1997. Vol. 3174, pp. 234–247. DOI: 10.1117/12.279785
16. Kuruliuk K.A., Kulesh V.P. Non-contact measurement of helicopter device position in wind tunnels with the use of optical videogrammetry method // 18th international conference on the Methods of Aerophysical Research ICMAR-2016 (Perm, 27 июня–03 июля 2016). — AIP Publishing, 2016, pp. 030006. DOI: 10.1063/1.4963948
17. Курулюк К.А. Videogramметрическая система для бесконтактных измерений полей деформаций крупногабаритных объектов // Труды МАИ. 2018. №102. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=98870>
18. Кулеш В.П., Наумов С.М. Бесконтактные измерения полей нормальной деформации поверхности конструкций методом видеogramметрии при испытаниях на прочность // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. XLIV. № 3. С. 91–103.
19. Копотева К.А., Кулеш В.П., Наумов С.М. Применение оптического метода видеogramметрии для измерений полей нормальной деформации элементов конструкций летательного аппарата // Мир измерений. 2013. № 10. С. 8–12.
20. Назаров А.С. Фотограмметрия: Учебное пособие для студентов вузов. — Минск: Тетра Системс, 2010. — 398 с.
21. Ефимов А.И., Ильин В.Н. Методология определения формы объектов по данным видеоряда камеры // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84590>



22. Ignatiev K.I., Lee W.-K., Fezzaa K., Stock S.R. Phase contrast stereometry: fatigue crack mapping in three dimensions // *Philosophical Magazine*. 2005. Vol. 85. No. 28, pp. 3273–3300. DOI: 10.1080/14786430500155387
23. Barrows D.A. Videogrammetric Model Deformation Measurement Technique for Wind Tunnel Applications // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (08-11 January 2007, Reno, NV, United States). AIAA Paper 2007–1163. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070003495>
24. Persson H. Estimation of Forest Parameters Using 3D Satellite Data: Stereogrammetry, radargrammetry and interferometry. — SLU Service/Repro, Uppsala/Alnarp. 2014, pp. 15–18. URL: [https://pub.epsilon.slu.se/11658/1/persson\\_h\\_141119.pdf](https://pub.epsilon.slu.se/11658/1/persson_h_141119.pdf)
25. Moratto Z.M., Broxton M.J., Beyer R.A., Lundy M., Husmann K. Ames Stereo Pipeline, NASA's Open Source Automated Stereogrammetry Software // 41st Lunar and Planetary Science Conference. 2010. URL: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/2364.pdf>
26. Аэрофототопографические и фотограмметрические приборы и системы измерений // История геодезии. 2015. URL: <https://istgeodez.com/aerofototopograficheskie-i-fotogramm/>

## APPLICATION OF OPTICAL VIDEOGRAMMETRY TECHNIQUE FOR NORMAL DEFORMATION FIELDS OF AIRCRAFT FUSELAGE PANEL MEASURING

Busarova M.V. \*, Zhelonkin S.V. \*\*, Kulesh V.P. \*, Kurulyuk K.A. \*\*\*

*Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky,  
TsAGI, 1, Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia*

\* e-mail: [mera@tsagi.ru](mailto:mera@tsagi.ru)

\*\* e-mail: [zhelonkin00@gmail.com](mailto:zhelonkin00@gmail.com)

\*\*\* e-mail: [ksusha\\_kp\\_13@mail.ru](mailto:ksusha_kp_13@mail.ru)

### Abstract

An important part of aircraft fuselage panels testing for fatigue and survivability is the study of normal deformation fields of buckling and warping of the skin. The article describes optical videogrammetry technique and its application for non-contact measurements of distributed normal fuselage panels' deformations of a passenger aircraft under testing for internal overpressure.

Strength, reliability and resource of modern aircraft are ensured by multilateral experimental studies of the structural elements behavior under regular and extreme external impacts. One of the types of such tests is the study of aircraft fuselage panels deformation under the impact of internal overpressure. Significant component of deformation herewith refers to the displacement of points in direction of a normal to the surface, i.e. normal deformation. These deformations are of a complex character distributed over the surface. To obtain the full pattern of the distributed normal deformation measurement in a large number of points are required. Strain gauging is a traditional technique for deformation measuring. However, complex deformation fields studying with strain gauge techniques is hampered with the uncertainty of nodal and critical points distribution

pattern, which complicates sensors placement and strain gage measurements results interpretation.

At present, contactless optical video-grammetry technique (VGT) manifested itself as a prospective trend for distributed deformations measuring. The results of measurements represent not relative deformation, but normal displacements of the surface points directly. It gives an additional advantage when interpreting the results and comparing them with the calculation or mathematical model of warping and buckling of the skin.

The goal of the presented work consisted in improving contactless optical video-grammetry technique for distributed normal deformations measuring at a large number of the surface points, and this technique application for testing aircraft fuselage panels under internal overpressure.

Video-grammetry technique with one digital camera was chosen (mono-grammetry method) for these measurements. This choice was stipulated by lack of space around the panel being tested on the experimental setup.

**Keywords:** non-contact measurements, videogrammetry technique, normal deformations, deformation fields, structure destruction.



## References

1. Baranov A.N. *Sticheskie i teploprochnostnye ispytaniya letatel'nykh apparatov* (Static and thermal strength tests of aircraft), Moscow, Izdatel'skii otdel TsAGI, 2009, 203 p.
2. Kurulyuk D.V. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2017, no. 4, pp. 51–53.
3. Knyaz' V.A. *Materialy Yubileinoi XXV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "GRAFIKON'2015" (Protvino, 22-25 September 2015)*. Protvino, Institut fiziko-tehnicheskoi informatiki, 2015, pp. 232–236.
4. Ahmadi F.F. Integration of industrial videogrammetry and artificial neural networks for monitoring and modeling the deformation or displacement of structures. *Neural Computing & Applications*, 2017, vol. 28, no. 12, pp. 3709–3716. DOI: 10.1007/s00521-016-2255-2
5. Atkinson K.B. (ed.) *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, Scotland, UK, 2001, 384 p.
6. Erickson G.E. *Overview of Supersonic Aerodynamics Measurement Techniques in the NASA Langley Unitary Plan Wind Tunnel*. Technical Report NASA/TM-2007-214894. NASA Center for AeroSpace Information, Hampton, Virginia, USA, 2007, 107 p.
7. Tret'yakova T.V., Tret'yakov M.P., Vil'deman V.E. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2011, no. 2, pp. 92–100.
8. Black J.T., Pitcher N.A., Reeder M.F., Maple R.C. Videogrammetry dynamics measurements of a lightweight flexible wing in a wind tunnel. *Journal of Aircraft*, 2010, vol. 47, no. 1, pp. 172–180. DOI: 10.2514/1.44545
9. Bepalov V.A., Ghotseliuk T.B., Laznenko S.A., Matveyev K.A., Chaplygin V.N. A computational evaluation of surface fracture growth and stress intensity factors for standard parts with complicated geometry. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 4, pp. 111–117.
10. Vinogradov Yu.I., Gusev Yu.A., Zolotukhin V.S. Research techniques for stress concentration in shells. *Aerospace MAI Journal*, 2005, vol. 12, no. 3, pp. 61–65.
11. Burner A.W., Liu T., DeLoach R. Uncertainty of videogrammetric techniques used for aerodynamic testing. *22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference (24-26 June 2002, St. Louis, Missouri)*. AIAA 2002-2794. DOI: 10.2514/6.2002-2794
12. Liu T., Cattafesta L.N., Radeztsky R., Burner A.W. Photogrammetry applied to wind-tunnel testing. *AIAA Journal*, 2000, vol. 38, no. 6, pp. 964–971. DOI: 10.2514/2.1079
13. Liu T., Burner A.W., Jones T.W., Barrows D.A. Photogrammetric techniques for aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2012, vol. 54, pp. 1–58. DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.03.002
14. Burner A.W., Liu T. Videogrammetric model deformation measurement technique. *Journal of Aircraft*, 2001, vol. 38, no. 4, pp. 745–754. DOI: 10.2514/2.2826
15. Burner A.W., Radeztsky R.H., Liu T. Videometric applications in wind tunnels. *The International Society for Optical Engineering (SPIE-1997, San Diego, California)*, 1997, vol. 3174, pp. 234–247. DOI: 10.1117/12.279785
16. Kuruliuk K.A., Kulesh V.P. Non-contact measurement of helicopter device position in wind tunnels with the use of optical videogrammetry method. *18th international conference on the Methods of Aerophysical Research ICMAR-2016 (Perm, 27 июня-03 июля 2016)*. AIP Publishing, 2016, pp. 030006. DOI: 10.1063/1.4963948
17. Kurulyuk K.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98870>
18. Kulesh V.P., Naumov S.M. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2013, vol. XLIV, no. 3, pp. 91–103.
19. Kopoteva K.A., Kulesh V.P., Naumov S.M. *Mir izmerenii*, 2013, no. 10, pp. 8–12.
20. Nazarov A.S. *Fotogrammetriya (Photogrammetry)*, Minsk, Tetra Systems, 2010, 398 p.
21. Efimov A.I., Il'in V.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84590>
22. Ignatiev K.I., Lee W.-K., Fezzaa K., Stock S.R. Phase contrast stereometry: fatigue crack mapping in three dimensions. *Philosophical Magazine*, 2005, vol. 85, no. 28, pp. 3273–3300. DOI: 10.1080/14786430500155387
23. Barrows D.A. Videogrammetric Model Deformation Measurement Technique for Wind Tunnel Applications. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (08-11 January 2007, Reno, NV, United States)*. AIAA Paper 2007-1163. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070003495>
24. Persson H. *Estimation of Forest Parameters Using 3D Satellite Data: Stereogrammetry, radargrammetry and interferometry*. SLU Service/Repro, Uppsala/Alnarp. 2014, pp. 15–18. URL: [https://pub.epsilon.slu.se/11658/1/persson\\_h\\_141119.pdf](https://pub.epsilon.slu.se/11658/1/persson_h_141119.pdf)
25. Moratto Z.M., Broxton M.J., Beyer R.A., Lundy M., Husmann K. Ames Stereo Pipeline, NASA's Open Source Automated Stereogrammetry Software. *41st Lunar and Planetary Science Conference, 2010*. URL: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/2364.pdf>
26. *Istoriya geodezii "Aerofototopograficheskie i fotogrammetricheskie pribory i sistemy izmerenii"*, 2015. URL: <https://istgeodez.com/aerofototopograficheskie-i-fotogramm/>