

**Выводы**

1. Рассмотрена РКН как объект управления на начальном участке полёта.
2. Проведен анализ устойчивости.
3. Оценена возможность выполнения безударного выведения РКН за границы габаритных точек стартовых сооружений путём выбора настроек системы стабилизации в пределах области устойчивости.
4. Предложено использовать манёвр увода, выбраны его параметры.

**Библиографические ссылки**

1. Бранец В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твёрдого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М. : Наука, 1973. – 320 с.
2. Колесников К. С. Динамика ракет : учебник для вузов / К. С. Колесников. – М. : Машиностроение, 1980. – 376 с.
3. Остославский И. В. Динамика полёта. Траектории летательных аппаратов / И. В. Остославский, И. В. Стражева. – М. : Машиностроение, 1969. – 499 с.

*Надійшла до редколегії 04.11.2014 р.*

УДК 620.1.535.41:772.99

**Ю. В. Сохач, В. Ф. Рожковский, А. Т. Кудреватых**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

**ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА СЛУЖБЕ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

Представлено історію розвитку в Дніпропетровському національному університеті методології та інструментальної бази неруйнівного голографічного контролю. Описано основні напрями та приклади практичної реалізації технологій контролю, розроблених співробітниками Діагностичної галузевої лабораторії голографії ДНУ.

*Ключові слова:* голографічні технології, ракетно-космічна техніка, дефектоскопія.

Представлена история развития в Днепропетровском национальном университете методологии и инструментальной базы неразрушающего голографического контроля. Описаны основные направления и примеры практической реализации технологий контроля, разработанных сотрудниками Диагностической отраслевой лаборатории голографии ДНУ.

*Ключевые слова:* голографические технологии, ракетно-космическая техника, дефектоскопия.

The history of the nondestructive holographic testing methodology and instrumentation development in Dnepropetrovsk National University is presented. The main directions and examples of the practical implementation of testing technologies developed by the staff of Diagnostic holography Laboratory in the DNU are described.

*Key words:* holographic technologies, rocket and space technology, defect inspection.

В конце 70-х годов прошлого века в Конструкторском бюро «Южное» активизировалось использование полимерно-композиционных материалов для создания ракет-носителей. Применение новых материалов вызвало необходимость создания высокоэффективных методов и средств неразрушающего контроля изделий.

В это же время в Проблемной научно-исследовательской лаборатории прочности и надежности конструкций Днепропетровского госуниверситета под руко-

водством академика НАН Украины В. И. Моссаковского начало развиваться новое научное направление – голографические методы исследований. Первые положительные результаты были получены при решении контактных задач теории упругости, однако очень скоро основные усилия исследователей были направлены на создание голографических технологий и устройств, позволяющих проводить неразрушающие исследования элементов и узлов ракетной техники. Это произошло при активном содействии начальника девятого комплекса КБ «Южное» В. Г. Ситало, начальника отдела Ф. П. Санина, начальника лаборатории В. Г. Тихого, начальника отдела Ю. Г. Артеменко и других сотрудников предприятия.

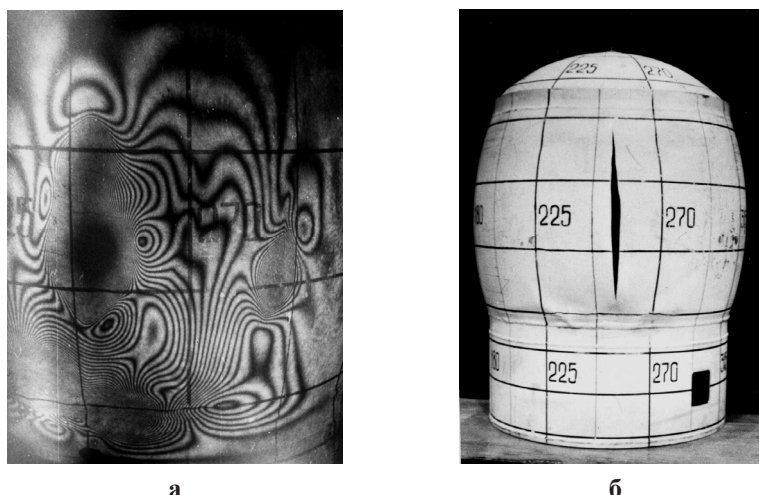
В 1980 г. сотрудниками лаборатории был получен диплом ВДНХ СССР за создание малогабаритной универсальной голографической установки, в 1981 г. – Премия Совета Министров СССР в области науки и техники за разработку и внедрение новых физических методов для исследования и совершенствования конструкций новой техники. Научный задел, созданный в те годы, позволил в 1983 г. создать при Днепропетровском госуниверситете новую Диагностическую отраслевую лабораторию голографии (ДОЛГ), призванную довести метод голографической интерферометрии до практического применения на натурных образцах ракетно-космической техники (РКТ). Лабораторию возглавили ученики академика В. И. Моссаковского – кандидат технических наук В. В. Петров (научный руководитель) и старший научный сотрудник Е. А. Ларионова (заведующая лабораторией).

В короткие сроки силами сотрудников лаборатории, при активной помощи и непосредственном участии Генерального директора Южного машиностроительного завода (ЮМЗ) А. М. Макарова и Генерального конструктора КБ «Южное» В. Ф. Уткина, было реконструировано здание лаборатории, спроектировано, изготовлено и смонтировано нестандартное оборудование. Это голографические установки, оснастка для закрепления изделий на голографических испытательных стендах, нагружающие устройства, стенд для гидроиспытаний конструкций на разрушение. Для экспериментальной отработки методик голографирования крупногабаритных объектов была создана уникальная установка со специальным «плавающим» фундаментом, оснащенная подъемными средствами, мощными лазерами. Профильное министерство для этих целей выделило соответствующие штаты и обеспечило финансирование проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В лаборатории трудились более 40 сотрудников разных специальностей – физики-оптики, физики-лазерщики, конструкторы, прочнисты, математики.

Новый импульс развития ДОЛГ получила после назначения ее научным руководителем члена-корреспондента АН Украины, первого заместителя Генерального конструктора ГКБ «Южное» Ю. А. Сметанина, который прекрасно знал проблемы отрасли и умело направлял научную деятельность сотрудников лаборатории.

Разработанные голографические методы и устройства использовались при отработке технологии изготовления композиционных пусковых мембран, раструбов из У-У материалов, хвостовых отсеков из ПКМ, модельных баков РДТТ и ЖРД, шаробаллонов и других деталей и узлов ракет [1]. Пример реализации метода на модельном баке ЖРД представлен на рис. 1.

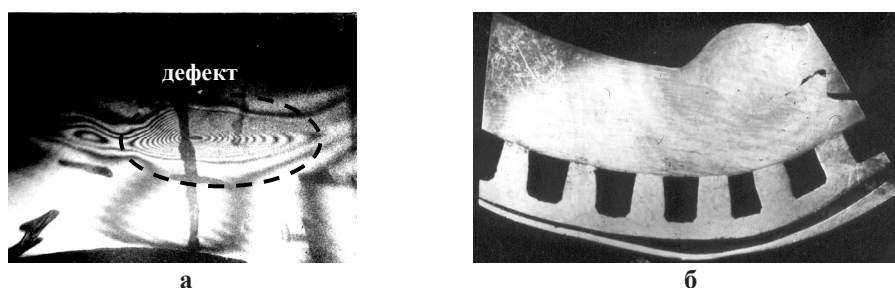
Созданные в ДОЛГ голографические установки отличались от известных тем, что оптические схемы располагались в специальных голографических камерах закрытого типа, пригодных для эксплуатации в производственных условиях, использовалась модульно-блочная компоновка оптических элементов с независимыми системами сопряжения и юстировки, что существенно облегчало их обслуживание. В комплект установок входили серийные лазеры либо изготовленные по специальному заказу их опытно-конструкторские образцы.



**Рис. 1. Модель ЖРД: а – интерференционный портрет; б – объект после разрушения (разрыв бака произошел в области, соответствующей максимальной плотности интерференционных полос)**

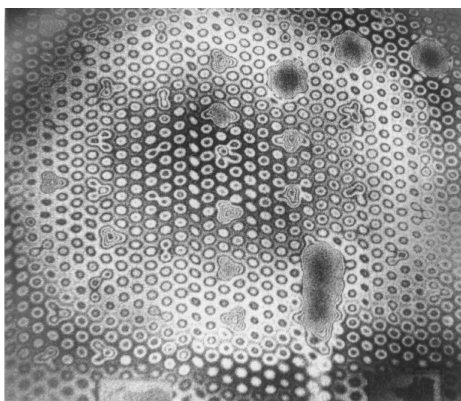
В 1985 г. сотрудниками лаборатории впервые в СССР был получен голографический интерференционный портрет натурального корпуса ракетного двигателя (РДТТ Д305), изготовленного из ПКМ. Длина корпуса составляла около 10 м, диаметр – 2,5 м. Голографические испытания были произведены с помощью опытного образца аргонового лазера «Днепр» непрерывного действия с мощностью излучения до 10 Вт (разработчик – ИАиЭ АН СССР, г. Новосибирск). Разработанная в лаборатории методика позволяла определять опасные в прочностном отношении места неравнопрочной композиционной оболочки. При голографировании использовалась также спроектированная в лаборатории и изготовленная на ЮМЗ специальная голографическая установка ГУ-2.

Большую роль в развитии и становлении лаборатории сыграло тесное сотрудничество ДОЛГ с КБ-4. В 1988 г. при непосредственном участии начальника отдела В. Н. Шнякина были разработаны и защищены авторским свидетельством технология и технические средства для неразрушающего контроля качества паяных швов камер сгорания ЖРД [7]. Данная разработка позволила существенно сократить стоимость изделий за счет отказа от изготовления образцов-свидетелей и проведения их разрушающих испытаний. В настоящее время при помощи голографической технологии, разработанной в ДОЛГ, на ГП ПО «ЮМЗ им. А. М. Макарова» проводится сплошной неразрушающий контроль качества паяных швов камер сгорания ракет-носителей «Зенит» и «Циклон-4». Пример использования метода приведен на рис. 2.



**Рис. 2. Фрагмент критического сечения камеры ЖРД: а – интерференционный портрет при наличии дефектного участка; б – вспучивание в области непропая после гидравлических испытаний (объект после разрезки)**

Одним из эффективных направлений использования голографических разработок ДОЛГ стала дефектоскопия сотовых панелей, которые используются в качестве каркасов солнечных батарей и корпусных деталей космических аппаратов [9]. В отличие от контактных методов неразрушающего контроля голографический контроль позволяет обнаруживать неприятели сот к очень тонким обшивкам без их повреждения. При этом обнаруживаются неприятели вдоль одной и даже части полки сотоблока. Голографическая методика и установка использовались при отработке конструкции и технологии изготовления каркасов солнечных батарей созданного в ГКБ «Южное» микроспутника «Египтсат» и других космических аппаратов (рис. 3).



**Рис. 3. Интерференграмма сотовой панели солнечной батареи с дефектами**

В последние десятилетия наиболее эффективным материалом для создания спутников считается углепластик. Основным его преимуществом является высокая терморазмеростабильность. Однако в силу ряда причин применение классических методов измерения коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) дает значительные погрешности (до 300%). В ДОЛГ разработана новая голографическая технология, позволяющая определять КЛТР с погрешностью не более 10%. В настоящее время она используется для отработки создаваемых в ГКБ «Южное» космических аппаратов. Данные разработки были проведены при содействии и активном участии сотрудников комплекса 9 и КБ-3 – начальника комплекса А. М. Потапова, начальников отделов Г. В. Тарасова, Ю. Г. Артеменко, ведущих специалистов В. В. Кавуна, А. П. Щудро, В. А. Коваленко и других [3; 8].

Одной из последних разработок лаборатории является создание голографического дифференциального манометра, который позволяет измерять изменение давления в емкостях с чувствительностью до  $1,3 \cdot 10^{-9}$  Па [4]. Он может быть использован, например, при контроле герметичности ракетных баков, в частности на стартовой площадке.

На современном этапе неотъемлемой частью голографических технологий стало создание высокопроизводительных автоматизированных систем обработки голографической информации. В лаборатории разработан новый метод расшифровки интерференграмм [5 – 6], основанный на методе конечных элементов. Использование разработанного подхода к обработке голографических интерференграмм дает возможность в автоматизированном режиме определять наличие, местоположение, форму, площадь и глубину залегания дефектов [10]. Разработанные информационно-измерительные технологии голографической интерферометрии прошли проверку на реальных узлах и агрегатах ракетно-космической техники и используются для отработки технологии изготовления, для совершенствования конструкций и неразрушающего контроля современных изделий РКТ в производственных условиях.



В условиях рыночных отношений одним из важных факторов является экономическая эффективность контроля. Для создания более благоприятных условий внедрения голографических технологий в производственные процессы в лаборатории разработан новый подход к оценке его эффективности для контроля той или иной конструкции. При создании технологии неразрушающего голографического контроля (НГК) любого типа изделий начальными этапами, определяющими эффективность применения данного вида контроля, являются выбор способа и параметров нагружения исследуемого объекта, выбор оптической схемы записи голографического интерференционного портрета (ГИП) объекта, являющегося основным источником данных об изменении состояния объекта под действием нагрузки. Как правило, отработка этих параметров осуществляется следующим образом: изготавливаются экспериментальные модели узлов или конструкций с заложенными дефектами; производится запись ГИП объектов при различных видах и параметрах нагрузок; после анализа полученных ГИП осуществляется корректировка схем нагружения и записи с целью их оптимизации. Ввиду высокой стоимости изготовления моделей аэрокосмической техники и длительности процесса экспериментальной отработки методик себестоимость создания технологии НГК оказывается достаточно высокой. Для повышения эффективности и оптимизации процесса контроля предложено ввести на начальном этапе создания и отработки его технологии построение математической модели процесса голографического контроля, которая включает в себя создание математической модели объекта контроля; моделирование поведения исследуемого объекта для определенных способов нагружения при различных параметрах нагружения; моделирование вида ГИП объекта при различных оптических схемах записи; определение расчетным путем минимальных размеров дефектов, выявляемых с использованием данной технологии; выбор оптимальных схем записи и нагружения объекта; определение целесообразности применения НГК для данного вида изделий [11].

До недавнего времени одним из существенных препятствий на пути внедрения голографических технологий в производство было отсутствие эффективных средств регистрации голограмм. Традиционное использование для этих целей высокоразрешающих фотопластин приводило к тому, что получение одной голограммы длилось в среднем около 30 минут. В настоящее время лаборатория оснащена современными фототермопластическими записывающими устройствами на жестком носителе, что дает возможность сократить время записи до нескольких секунд, а также производить наблюдение интерферограмм в реальном масштабе времени.

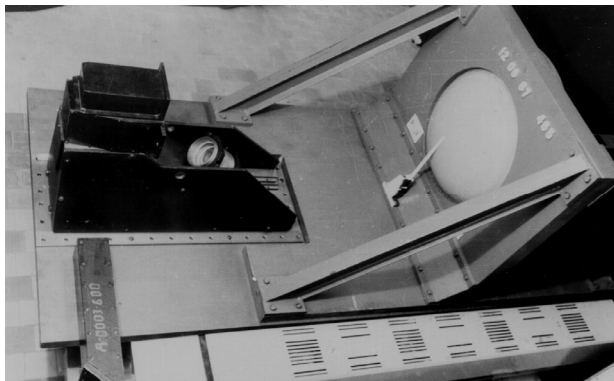
Значительный прогресс имеет место и в лазерной технике. Как правило, в лаборатории используются современные полупроводниковые лазеры мощностью в несколько десятков милливатт с длиной когерентности до 10 и более метров, что позволяет осуществлять голографирование практически любых объектов ракетно-космической техники.

Указанные достижения технического прогресса привели к тому, что разрабатываемые лабораторией голографические установки из многотонных с ручным управлением превратились в малогабаритные, автоматизированные и приспособленные для работы в производственных условиях (рис. 4).

В настоящее время сотрудниками лаборатории активно проводятся исследования по разработке новых технологий контроля, основанных на принципах современной оптической интерферометрии с цифровой регистрацией, в частности корреляционной и спекл-интерферометрии, интерференционной микроскопии.

Полученные научные и технические результаты используются при подготовке кафедрой радиоэлектронной автоматики физико-технического факультета бакалавров, специалистов и магистров направления «Приборы и системы неразру-

шающего контроля». Выпущенное сотрудниками лаборатории учебное пособие по голографическим технологиям [2] отмечено специальным дипломом на Втором профессиональном конкурсе Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики.



а



б

**Рис. 4. Голографическая установка:**  
**а – образца 1984 г. (габариты 1000x500x500 мм);**  
**б – образца 2013 г. (габариты 200x100x80 мм)**

### Библиографические ссылки

1. **Ларионова Е. А.** Голографические исследования аномальных зон деформирования емкостей наддува применительно к технологии их испытаний на прочность / Е. А. Ларионова // Вестник ДГУ. Серия «Ракетно-космическая техника». – 1999. – Вып. 3.
2. **Ларіонова О. О.** Голографічні технології в авіаційно-космічній техніці : навч. посібник для студентів вищих навч. закладів / О. О. Ларіонова, В. Ф. Рожковський, Ю. В. Сохач; за ред. В. П. Малайчука. – Д. : РВВ ДНУ, 2003. – 280 с.
3. **Малков И. В.** Исследование терморазмеростабильности конструкций космических аппаратов / И. В. Малков, В. А. Коваленко, Г. В. Сыровой, Ю. В. Сохач // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. – Х. : ХАИ, 2011. – Вып. 2 (66). – С. 20–34.
4. Патент України на корисну модель №41632 МПК<sup>2009</sup> G01L 7/00 Мембранний манометр вимірювання малого тиску / Ю. В. Сохач, В. Ф. Рожковський, О. Т. Кудреватих, В. Г. Тихий, О. Л. Аліньков. – №u200901241. Заявл. 16.02.2009; опубл. 25.05.2009 // Бюл. № 10.
5. **Рожковский В. Ф.** Применение метода конечных элементов для расшифровки голографических интерферограмм / В. Ф. Рожковский, Н. А. Бузская // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія «Ракетно-космічна техніка». – 2006. – Вип. 9. – С. 98–105.
6. **Рожковский В. Ф.** Применение метода конечных элементов для построения поля направлений в задаче интерпретации интерферограмм / В. Ф. Рожковский, Н. В. Саган // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. пр. – Д. : Вид-во ДНУ, 2012. – Вип. 18. – С. 175–182.
7. **Сохач Ю. В.** Голографическая технология контроля непропаев в камерах ЖРД / Ю. В. Сохач, А. Г. Пилипенко // Вестник ДГУ. Серия «Ракетно-космическая техника». – 1998. – Вып. 2.
8. **Сохач Ю. В.** Голографическая дилатометрия стержневых элементов конструкций космических аппаратов / Ю. В. Сохач, Е. А. Крылов, А. А. Крутин // Там же.
9. **Сохач Ю. В.** Голографическая дефектоскопия сотовых панелей с особо тонкими обшивками / Ю. В. Сохач, Е. А. Крылов, А. Г. Пилипенко, Н. А. Бузская // Там же. – 1999. – Вып. 3.
10. **Сохач Ю. В.** Теоретико-экспериментальные исследования узлов ракетно-космической техники в процессе дефектоскопии / Ю. В. Сохач, В. Ф. Рожковский, А. Г. Пилипенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – К., 2005. – № 4. – С. 3–7.

11. Сохач Ю. В. Развитие голографических технологий в ДНУ / Ю. В. Сохач // Вестник ДНУ. Серия «Ракетно-космическая техника». – 2008. – Вып. 12. – С. 176–180.

*Надійшла до редколегії 16.10.2014 р.*

УДК 620.1.535.41:772.99

**А. Н. Товстик<sup>1</sup>, А. Б. Закарлюка<sup>2</sup>, А. Н. Петренко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

<sup>2</sup>ОАО «НПП Машиностроение»

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕНЕВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Розглянуто ультразвуковий тіньовий метод неруйнівного контролю полімерних композиційних матеріалів. Проведено огляд датчиків для здійснення контролю. Показано ефективність використання цього методу, його особливості та способи підвищення інформативності контролю.**

*Ключові слова:* неруйнівний контроль, полімерні композиційні матеріали, ультразвукові датчики, обробка результатів, нейронні мережі.

**Рассмотрен ультразвуковой бесконтактный теневой метод неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов. Проведен обзор датчиков для осуществления контроля. Показаны эффективность применения данного метода, его особенности и способы повышения информативности контроля.**

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, полимерные композиционные материалы, ультразвуковые датчики, обработка результатов, нейронные сети.

**Ultrasonic noncontact shadow method of nondestructive testing of polymer composite materials was discussed. overview of the ultrasound transducers were discussed. The effectiveness of this method, its features and ways to enhance the informativeness of control were considered.**

*Key words:* ultrasonic non-destructive testing, polymer composite materials, ultrasound transducers, analysis of the results, neural networks.

**Введение.** Сегодня в ракетно-космической отрасли, авиации широкое применение получили ПКМ с сотовым наполнителем, которые имеют такие преимущества, как прочность несущих слоев, жесткость на изгиб, надежность. Сотовые конструкции, выполненные из полимерных композиционных материалов (ПКМ), применяют на самолетах АН-72, ИЛ-96, Ту-204, вертолетах Ка-50.

При изготовлении и эксплуатации ПКМ необходима оценка их текущего состояния. При помощи неразрушающего контроля возможно оценивать текущее состояние. Есть особые требования к НК сотовых конструкций: отсутствие контактной жидкости, недопустимость больших механических нагрузок [1–2].

На рис. 1 представлены образцы изделий из полимерных композиционных материалов с сотовым наполнителем.

**Особенности контроля изделий.** Основными видами дефектов в ПКМ с сотовым наполнителем являются неприклеи обшивок к наполнителю и расслоения в обшивках (рис. 2, 3) [3–4].

В основном применяются такие виды неразрушающего контроля: тепловой, голографический, рентгеновский, акустический, ультразвуковой.