

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2025

- А. В. Ивченко** кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [fgrt@yandex.ru](mailto:fgrt@yandex.ru)
- А. И. Жужукин** кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ-201; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [cntkknio@yandex.ru](mailto:cntkknio@yandex.ru)
- Р. Н. Сергеев** инженер НИИ-201; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [romansr@yandex.ru](mailto:romansr@yandex.ru)
- А. И. Сафин** кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [safin.ai@ssau.ru](mailto:safin.ai@ssau.ru)

Предложен экспериментальный способ исследования собственных форм колебаний рабочих поверхностей крупногабаритных оптически-прозрачных деталей, используемых в изображающих и интерференционных системах, входящих в состав оптико-электронных измерительных комплексов. На основе помехоустойчивого спекл-интерферометра разработана оптическая система, обеспечивающая регистрацию полей нормальной составляющей вектора вибро смещения плоской оптической поверхности, на которую нанесено диффузно-рассеивающее покрытие. Определено оптимальное пропускание покрытия для получения контрастных спекл-интерферограмм. Исследованы формы колебаний плоского диффузно-рассеивающего элемента, входящего в состав цифрового спекл-интерферометра, с целью верификации результатов численного моделирования его колебаний на резонансных частотах. Выявлены расхождения экспериментальных и расчётных результатов в пределах 5...7% для собственных форм колебаний, зарегистрированных в диапазоне от 0 до 900 Гц.

*Оптический элемент; возбуждение; спекл-интерферометр; метод; регистрация; вибрация; вибро смещение; собственные частоты и формы колебаний конструкции*

---

**Цитирование:** Ивченко А.В., Жужукин А.И., Сергеев Р.Н., Сафин А.И. Исследование вибрационных характеристик оптически прозрачных деталей с применением метода конечных элементов и цифровой спекл-интерферометрии // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 1. С. 114-130. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-114-130

### Введение

Особые условия эксплуатации аэрокосмической техники определяют высокие требования к качеству и безопасности создаваемых изделий и, как следствие, к безотказности входящих в их состав систем и агрегатов. Согласно [1 – 3], обеспечение надёжности данных изделий осуществляется в процессе разработки, доводки и производства. Одним из важных аспектов отработки изделий на надёжность являются тестовые испытания деталей и узлов, связанные с исследованием возникающих при эксплуатации динамических процессов, а также с обеспечением их прочности [4]. При этом

наибольшее внимание уделяется изучению выносливости изделий при знакопеременных нагрузках вследствие внезапных разрушений металла из-за усталости [5].

Известно [6], что вибропрочностные испытания газотурбинных двигателей (ГТД) начинаются с определения собственных форм и частот колебаний ответственных элементов конструкции, что позволяет провести мероприятия по доводке разрабатываемого изделия. Аналогичные задачи решаются и для космических аппаратов (КА) с целью предотвращения их повреждения на активном участке выведения в космическое пространство [7]. Эти проблемы относятся к бортовым оптико-электронным системам и измерительным комплексам вследствие невозможности обеспечения достаточной жёсткости их конструкции при наличии ограничений на массогабаритные характеристики [8]. В полёте недостаточная жёсткость конструкции оптико-электронных систем приводит также к распространению по компонентам изделия вибрационных возмущений от работающих силовых агрегатов КА, что в настоящий момент является одним из главных ограничений на пути повышения пространственного разрешения изображений, регистрируемых при дистанционном зондировании Земли [9 – 10] и других небесных тел [11]. Согласно результатам моделирования [12], вибрационные возмущения, генерируемые двигательной установкой при маневрировании КА, плохо рассеиваются компонентами космического аппарата и возбуждают медленно затухающие колебания на собственных частотах конструкции. Наличие данного эффекта определяет необходимость детального исследования вибрационных характеристик оптико-электронных приборов и разработки на основе полученной информации специальных методов гашения колебаний [13; 14]. При этом надо учитывать [15; 16], что в состав оптико-электронных систем входят оптически прозрачные элементы, являющиеся неотъемлемой частью бортового оборудования КА. В процессе эксплуатации оптические детали подвергаются воздействию сопутствующих факторов полёта, что отражается на процессе регистрации и может повлиять на результаты работы оптической системы в целом. Распространение вибрации особенно сказывается на функционировании изображающих и интерференционных оптических систем, в которых изменение разности хода лучей вследствие микро-перемещений может привести к нарушению процесса регистрации изображения [17; 18]. Поэтому получение экспериментальной информации о полях вибросмещений рабочих поверхностей оптически прозрачных элементов становится важной задачей.

Обычно оценка качества оптических элементов при производстве и эксплуатации осуществляется оптическими методами [19 – 21], которые могут быть использованы как для определения фундаментальных оптических констант материала, так и для контроля характеристик и свойств поверхностного слоя. Согласно [21; 22] многие параметры поверхностей оптических изделий могут быть определены методами голографической и спекл-интерферометрии, которые обладают высокой чувствительностью и точностью. Однако применение метода спекл-интерферометрии для контроля вибрационных характеристик рабочих поверхностей оптических деталей является недостаточно изученным и нуждается в экспериментальной апробации и проверке.

В настоящей работе исследовалась возможность применения метода цифровой спекл-интерферометрии с усреднением во времени [23] для выявления собственных частот и форм крупногабаритной оптической детали на примере оптической поверхности диффузно-рассеивающего элемента, входящего в состав оптической схемы цифрового спекл-интерферометра [24 – 26]. В оптической схеме данного прибора [27] диффузно-рассеивающий элемент использовался в качестве полупрозрачного зеркала, которое обеспечивает формирование опорного оптического пучка интерферометра. Колебания поверхности диффузно-рассеивающего элемента в процессе работы спекл-интерферометра создают дополнительные разности хода и снижают контраст регистри-

руемой интерференционной картины [28]. Поэтому исследование вибрационного состояния диффузно-рассеивающего элемента цифрового спекл-интерферометра представляет собой не только фундаментальную, но и прикладную задачу, направленную на повышение помехоустойчивости разрабатываемой лазерной системы [24 – 26].

### Экспериментальная установка

Экспериментальная регистрация собственных форм и частот рабочих поверхностей оптически прозрачных деталей производилась на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. В состав экспериментальной установки входил цифровой спекл-интерферометр (поз. 1 – 11), пьезоэлектрическая система возбуждения колебаний исследуемого объекта (поз. 12 – 13) и система регистрации акустического отклика объекта на механическое возбуждение (поз. 14 – 15). Дополнительно вибрационные характеристики исследуемого оптического элемента регистрировались при помощи доплеровского вибрметра PDV-100, что позволяло локально определять уровни виброскорости  $VS$ , а также уточнять значения частоты колебаний  $f$  выбранных участков поверхности.

Оптическая схема используемого спекл-интерферометра соответствовала [27] и была построена на основе непрерывного одномодового лазера LCS-DTL-317 ( $P=0,055$  Вт,  $\lambda=532$  нм). Спекл-интерферометр состоял из приёмно-передающего блока (поз. 1 – 6), компьютерной системы обработки данных (поз. 7) и узла крепления исследуемого объекта (поз. 8 – 11, рис. 1). Особенностью оптической схемы интерферометра было использование диффузно-рассеивающего элемента, устанавливаемого перед неподвижной стальной опорной плитой (поз. 11).

Диффузно-рассеивающий элемент состоял из плоской оргстеклянной пластины с габаритами  $410 \times 410 \times 5$  мм, закреплённой на металлической раме, соединённой с опорной плитой (поз. 11) при помощи подвески (поз. 9, рис. 1).

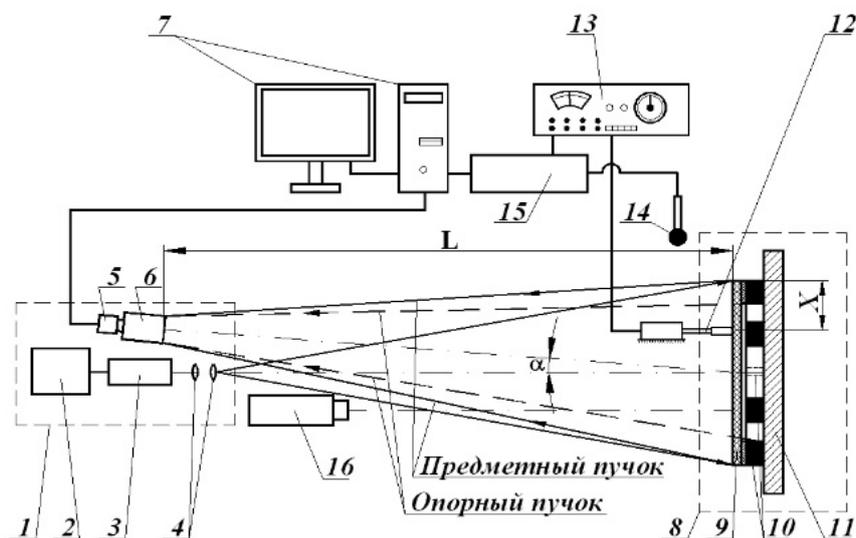


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – приёмно-передающий блок спекл-интерферометра; 2, 3 – DPSS-лазер; 4 – формирователь пучка; 5, 6 – видеокамера с Зоот-объективом; 7 – компьютер; 8 – узел крепления объекта исследования; 9 – диффузно-рассеивающий элемент (объект исследования); 10 – подвеска; 11 – опорная плита; 12 – пьезоэлектрический привод; 13 – звуковой генератор ГЗ-56; 14 – микрофон; 15 – осциллограф PCS1000; 16 – лазерный доплеровский вибрметр PDV-100

Параметры оптической схемы спекл-интерферометра:  $L = 2000$  мм;  $\alpha = 10 \dots 15^\circ$

Положение пьезоэлектрического привода при возбуждении объекта исследования  $X = 0 \dots 410$  мм

В экспериментах использовались два варианта подвески, состоящей из: ферромагнитных колец (рис. 2, *а*) и четырёх стальных шпилек (рис. 2, *б*). Изменение способа крепления диффузно-рассеивающего элемента позволяло оценить влияние жёсткости подвески на регистрируемые формы колебаний, а также в дальнейшем прояснить вопрос о распространении колебаний по элементам конструкции узла крепления (рис. 2).

Возбуждение диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра осуществлялось посредством подачи синусоидального сигнала от звукового генератора (поз. 13) на пьезоэлектрический привод (поз. 12, рис. 1). Для повышения эффективности возбуждения той или иной формы колебаний объекта, пьезоэлектрический привод перемещался вдоль нижней кромки диффузно-рассеивающего элемента (рис. 2) и устанавливался в необходимое положение  $X$  (рис. 1). В данном положении регистрация формы колебаний диффузно-рассеивающего элемента осуществлялась при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебаний объекта. Это состояние контролировалось по изменению фигур Лиссажу [24], образованных сигналами с микрофона (поз. 14) и звукового генератора (поз. 13, рис. 1).

При оптической регистрации собственных форм колебаний объекта исследования, в оптической схеме (рис. 1) неподвижная плита (поз. 11) с нанесённым на поверхность светорассеивающим покрытием [24] формировала опорный пучок спекл-интерферометра, а предметный пучок возникал при обратном рассеянии лазерного излучения от внешней поверхности элемента (поз. 9). Таким образом, в рассматриваемой оптической схеме была осуществлена инверсия опорных и предметных плеч спекл-интерферометра, что является существенным отличием данного устройства от описанных ранее подобных лазерных систем [24 – 28].

Взаимодействие опорного и предметного пучков спекл-интерферометра в процессе записи приводило к образованию на поверхности светочувствительной матрицы камеры (поз. 5 – 6, рис. 1) интерференционной картины, обусловленной вибрацией объекта.

При этом помехоустойчивость процесса регистрации интерференционной картины в отсутствии виброизоляции оптической схемы спекл-интерферометра обеспечивалась накоплением и статистической обработкой регистрируемых изображений согласно методике [29].

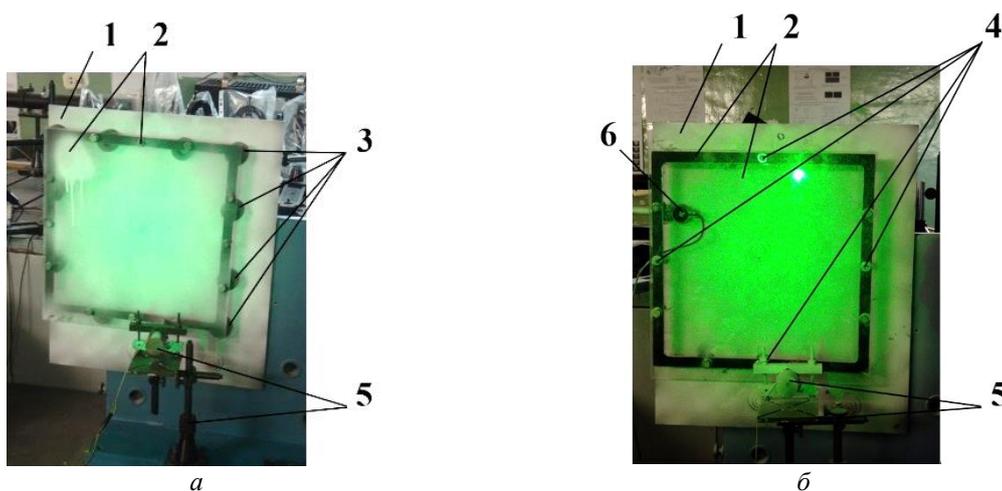


Рис. 2. Узел крепления диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра, установленного на магнитной подвеске (*а*) и при помощи шпилек (*б*):

1 – опорная неподвижная плита; 2 – диффузно-рассеивающий элемент; 3 – ферромагниты; 4 – шпильки; 5 – пьезоэлектрический привод; 6 – датчик фотометра для определения прозрачности покрытия диффузно-рассеивающего элемента

Необходимо отметить, что изменение прозрачности диффузно-рассеивающего элемента влияло на соотношение интенсивностей опорного и предметного пучков спекл-интерферометра и определяло качество записанных спекл-интерферограмм [30; 31]. Данное соотношение могло быть изменено путём напыления светорассеивающего покрытия на внешнюю поверхность диффузно-рассеивающего элемента [24]. Для определения прозрачности нанесённого покрытия в настоящей работе использовался датчик фотометра (поз. 6, рис. 2), установленный между опорной плитой (поз. 1) и диффузно-рассеивающим элементом (поз. 2). В соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера [32] снижение интенсивности излучения на датчике при напылении покрытия свидетельствовало об увеличении оптической плотности нанесённого слоя и снижении прозрачности диффузно-рассеивающего элемента.

Таким образом, рассматриваемая экспериментальная установка обеспечивала не только решение задачи исследования вибрационных характеристик прозрачных оптических элементов, но и позволяла определить степень влияния на полученные результаты механических свойств подвески и оптических свойств напыляемого светорассеивающего покрытия.

### **Результаты и обсуждение**

Исследование вибрационных характеристик диффузно-рассеивающего элемента цифрового спекл-интерферометра [24] в настоящей работе осуществлялось экспериментально посредством цифровой спекл-интерферометрии, а также теоретически методом конечных элементов (МКЭ) [33]. Данный подход позволял сопоставить результаты двух независимых методов исследования, а также верифицировать разработанную численную модель диффузно-рассеивающего элемента для последующего моделирования процессов работы цифрового спекл-интерферометра. Исследование данных процессов позволит усовершенствовать конструкцию используемой лазерной системы и повысить её устойчивость к внешним случайным механическим воздействиям при цифровой записи интерференционных картин.

Конечно-элементная модель диффузно-рассеивающего элемента, закрепленного на опорной плите (рис. 1), создавалась на основе натуральных замеров геометрии и выбора свойств материалов в соответствии со справочными данными [34 – 36]. Диффузно-рассеивающий элемент с оргстеклянной пластиной толщиной  $h = 5$  мм был разбит на 8177 элементов типа Plate библиотеки Femap/Nastran [33]. Опорная плита моделировалась при помощи 3719 элементов типа Plate, а для имитации подвески диффузно-рассеивающего элемента использовались стандартные упругие элементы DOF Spring [36]. Механические свойства элементов DOF Spring подбирались с учётом экспериментальных данных, полученных в [28] об ускорении металлической рамы диффузно-рассеивающего элемента. При этом в расчётах допускалось, что связанная система в виде опорной плиты и диффузно-рассеивающего элемента была соединена с абсолютно жёстким основанием. Предложенная модель обеспечивала получение собственных частот объекта при проведении анализа на отклик от гармонического возбуждения, а также вычисление параметров вибрации его рабочей поверхности.

Для верификации разработанной численной модели колебаний диффузно-рассеивающего элемента были проведены серии экспериментальных исследований направленных на выявление характерных форм колебаний исследуемого компонента спекл-интерферометра (рис. 3, 6, 8). Возбуждение и поиск собственных форм колебаний диффузно-рассеивающего элемента, установленного как на магнитной подвеске, так и на четырёх шпильках, производилось в частотном диапазоне от 0 до 900 Гц. Обнаруженные экспериментально формы колебаний сопоставлялись с расчётными данными по распределению вибросмещений объекта и по частоте. Рассогласование

экспериментально полученных и расчётных частот представляло собой показатель качества созданной численной модели, который использовался в дальнейшем для её коррекции [37].

Проводимые в работе экспериментальные исследования были осуществлены в два этапа. На первом этапе проводимые эксперименты были выполнены с целью оптимизации режимов регистрации спекл-интерферограмм, а также выбора оптимального варианта подвески диффузно-отражающего элемента. На втором этапе исследования были зарегистрированы формы колебаний исследуемого объекта, и проведено сопоставление полученной информации с результатами численного моделирования.

При проведении первой серии экспериментов была обнаружена проблема, связанная с процессом записи интерференции опорного и предметного пучков. Хотя регистрация спекл-интерферограмм осуществлялась при прозрачности диффузно-рассеивающего элемента ( $\tau = 0,8...0,9$ ), оптимальной для традиционной оптической схемы [24 – 28], интерференционные полосы на спекл-изображениях получались с низким контрастом, что могло затруднить их последующий анализ и расшифровку. Наличие данного эффекта потребовало проведения специальных исследований по определению оптимальной прозрачности диффузно-рассеивающего элемента с целью повышения качества записи интерференционных картин.

Изменение оптической плотности диффузно-рассеивающего элемента производилось последовательным напылением слоёв светорассеивающего покрытия на поверхность оргстеклянной пластины с исходным пропусканием на уровне  $\tau_p = 0,92...0,94$ . Нанесённый светорассеивающий слой характеризовался величиной пропускания  $\tau_c$ , которая уменьшалась по мере нанесения последующих слоёв покрытия. Общее пропускание диффузно-рассеивающего элемента  $\tau$  определялось прозрачностью оргстеклянной подложки и нанесённого на её поверхность светорассеивающего слоя, и было представлено выражением:  $\tau = \tau_p \cdot \tau_c$  [38]. При оптимизации пропускания диффузно-рассеивающего элемента производилась регистрация спекл-интерферограмм колебаний объекта при постоянном уровне возбуждения на частоте  $f = 204$  Гц (рис. 3).

Для полученных спекл-изображений определялась степень видности интерференционных полос в соответствии с методикой [24; 28]. Уровни контраста измерялись по нулевой светлой и первой тёмной полосам интерферограммы (рис. 3). При этом полученная зависимость видности  $V^I$  от прозрачности диффузно-рассеивающего элемента  $\tau$  представлена на рис. 4.

Согласно рис. 4 наиболее контрастные спекл-интерферограммы получались при использовании оптически плотных диффузно-рассеивающих элементов, прозрачность которых находилась в пределах  $\tau = 0,40...0,60$  и соответствовала пропусканию светорассеивающего слоя  $\tau_c = 0,43...0,63$ . В данных условиях видность интерференционных полос достигала  $V^I = 0,3...0,32$  и снижалась при  $\tau > 0,60$  практически до нуля. Необходимо отметить, что использование диффузно-рассеивающих элементов повышенной оптической плотности с  $\tau < 0,40$  также вело к снижению контраста интерференционных полос до уровня видности  $V^I = 0,25$ . При этом падение контраста интерференционных полос при  $\tau < 0,40$  сопровождалось качественными изменениями регистрируемой интерференционной картины (рис. 3).

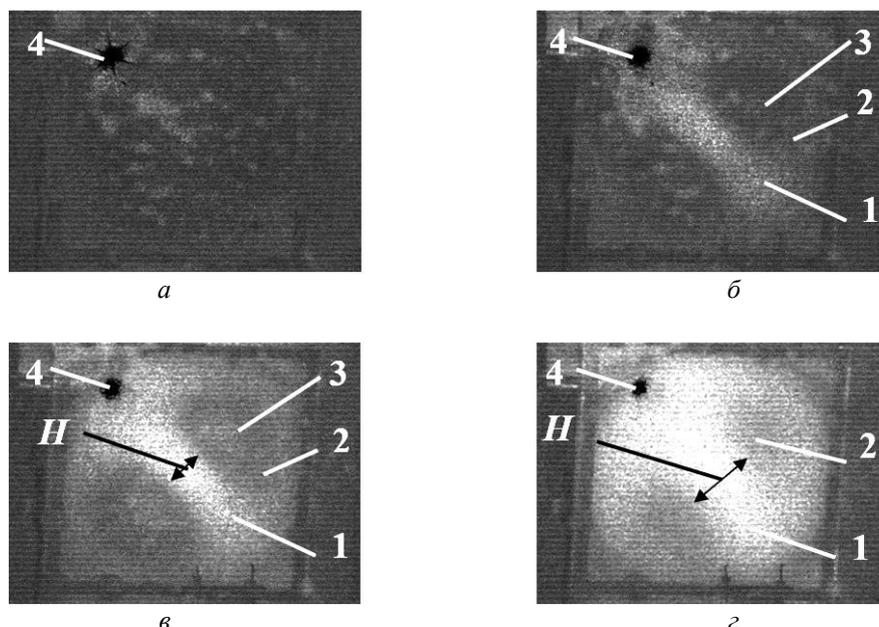


Рис. 3. Характерный вид спекл-интерферограмм колебания диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра на возбуждающей частоте  $f = 204$  Гц в зависимости от прозрачности  $\tau_c$  нанесённого светорассеивающего покрытия:

$a$  – без покрытия ( $\tau_c = 1$ );  $б$  –  $\tau_c = 0,8$ ;  $в$  –  $\tau_c = 0,49$ ;  $г$  –  $\tau_c = 0,32$

1 – светлая интерференционная полоса нулевого порядка (зона узла); 2 – тёмная интерференционная полоса 1-го порядка; 3 – светлая интерференционная полоса 2-го порядка; 4 – блик на поверхности диффузно-рассеивающего элемента;  $H$  – ширина светлой интерференционной полосы нулевого порядка

Несмотря на одинаковый уровень механического возбуждения объекта, снижение пропускания диффузно-рассеивающего элемента с 0,4 до 0,25 приводило к уменьшению числа наблюдаемых интерференционных полос на его поверхности (сравните рис. 3, в и рис. 3, г) и могло привести к неверной оценке величины вибро смещения при количественном анализе спекл-интерферограммы. Наблюдаемый здесь негативный эффект может быть связан с изменением индикатрисы рассеивания наносимого покрытия по мере увеличения его оптической плотности [39]. Частично это подтверждается уменьшением размеров, связанного с зеркальным отражением блика на рис. 3, а также уширением светлой интерференционной полосы нулевого порядка в 1,6 раза (рис. 3, в, г и рис. 5).

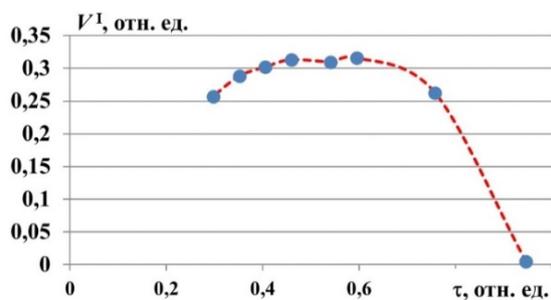


Рис. 4. Изменение видности спекл-интерферограмм  $V^1$  в зависимости от суммарной прозрачности  $\tau$  диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра

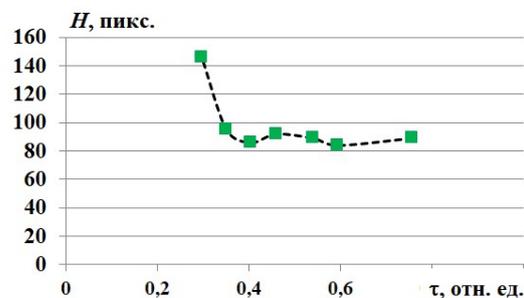


Рис. 5. Изменение ширины  $H$  светлой интерференционной полосы нулевого порядка в зависимости от суммарной прозрачности диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра  $\tau$

Полученные результаты позволили установить оптимальный диапазон прозрачности светорассеивающего покрытия для нанесения на поверхность оптически прозрачных элементов, что открывает путь для надёжного определения их вибрационных характеристик методом цифровой спекл-интерферометрии. Тем не менее наблюдаемые здесь эффекты нуждаются в дальнейших экспериментальных исследованиях и теоретическом осмыслении.

Хотя регистрация спекл-интерферограмм колеблющегося диффузно-рассеивающего объекта после подбора прозрачности светорассеивающего покрытия успешно осуществлялась на магнитной подвеске и шпильках (рис. 6), в целом методика нуждалась в проведении дополнительных исследований по оптимизации способа крепления в установке оптически прозрачного изделия. Сравнение вибрационных характеристик диффузно-рассеивающего элемента, закреплённого на магнитной подвеске и шпильках, показало на различную эффективность возбуждения форм колебаний объекта исследования, а также на отсутствие совпадения собственных частот колебаний. При возбуждении объекта, установленного на магнитной подвеске, целый ряд собственных форм колебаний не возбуждались. При этом отклонения экспериментально зарегистрированных собственных частот при креплении диффузно-рассеивающего элемента на магнитной подвеске от результатов расчёта были значительно больше, чем при регистрации объекта, закреплённого на шпильках, и составляли соответственно 20...30% против 10...20%.

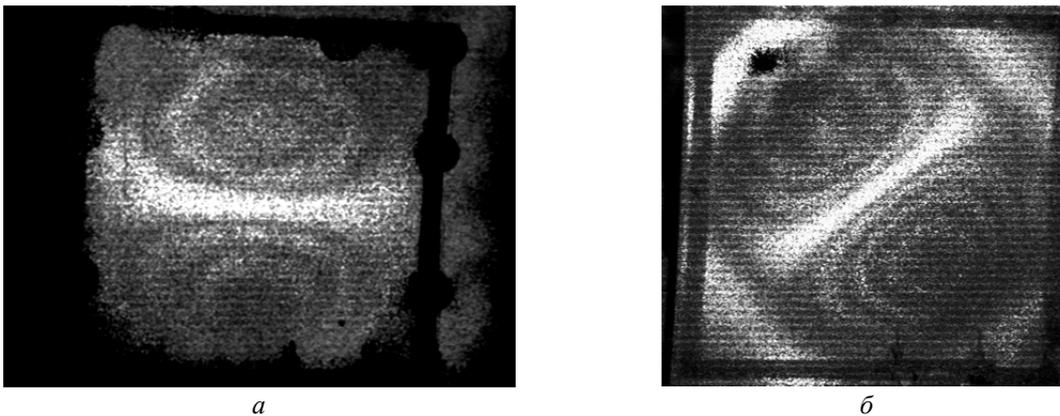
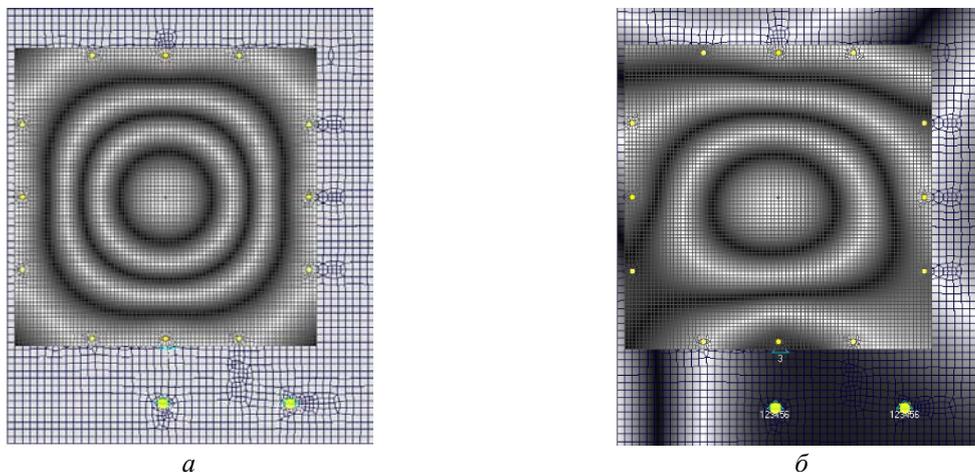


Рис. 6. Результаты регистрации спекл-интерферограмм колеблющегося диффузно-рассеивающего элемента при использовании различного способа крепления: а – магнитная подвеска ( $f = 170$  Гц); б – четыре шпильки ( $f = 211$  Гц)

Причина такого результата, очевидно, могла быть связана с различной жёсткостью используемых элементов подвески, а также с возможностью передачи колебаний через подвеску от диффузно-рассеивающего элемента на опорную плиту [25; 40]. Наличие данного эффекта было подтверждено результатами численного моделирования, приведёнными на рис. 7. Согласно численным исследованиям, было отмечено, что увеличение податливости опорной плиты приводит не только к изменению собственных частот колебаний диффузно-рассеивающего элемента и порога его возбуждения, но и к искажению форм колебаний исследуемого объекта (сравните рис. 7, а и рис. 7, б). Присутствие колебаний на поверхности опорной плиты при возбуждении диффузно-рассеивающего элемента нашло подтверждение при выполнении доплеровских измерений локальных значений нормального компонента виброскорости  $V_{S_n}$  в окрестности одной из точек крепления. Измерения показали наличие на поверхностях диффузно-

рассеивающего элемента и опорной плиты виброскоростей, достигающих уровня 1...1,5 мм/с. При этом вибрация диффузно-рассеивающего элемента при использовании крепления на четырёх шпильках снижалась в 2...3 раза по сравнению с использованием магнитной подвески.



*Рис. 7. Влияние жёсткости подвески и опорной плиты узла крепления на процесс получения формы колебания диффузно-рассеивающего элемента при возбуждении на частоте  $f = 102$  Гц по данным расчёта методом конечных элементов:*

*а – подвеска и опорная плита абсолютно жёсткие;  
б – подвеска и опорная плита обладают податливостью*

Значительный рост вибрационного возбуждения диффузно-рассеивающего элемента в случае магнитной подвески может быть обусловлен повышенной податливостью используемых магнитов по сравнению с монолитными шпильками, а также влиянием на процесс передачи вибрации магнитных сил, которые препятствуют затуханию колебаний конструкции [41].

Особенность выявленного вибрационного состояния диффузно-рассеивающего элемента при закреплении на шпильках была использована на заключительной стадии проводимых исследований, главной задачей которых являлось формирование набора форм колебаний оптической поверхности прозрачного изделия и сопоставление полученных результатов с данными численного моделирования. На данном этапе расчётная модель была повторно скорректирована по параметрам упругих свойств материалов, входящих в неё компонентов, что позволило сократить различия между расчётными и экспериментальными данными.

Ряд экспериментально зарегистрированных форм колебания диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра совместно с результатами расчёта МКЭ представлены на рис. 8. При проведении экспериментов диффузно-рассеивающий элемент возбуждался в трёх различных точках на расстоянии  $X = 175, 253, 320$  мм от его левого нижнего угла. Использование различных положений возбудителя позволило избежать попадания точки контакта в зону расположения узла исследуемой формы колебаний, что облегчало процесс её обнаружения. При  $X = 175$  мм была зарегистрирована форма колебаний на частоте  $f = 471$  Гц, при  $X = 253$  мм были записаны две формы колебаний с частотами  $f = 102$  и  $f = 151$  Гц, а при  $X = 320$  мм – форма колебаний с  $f = 865$  Гц. Отклонения между экспериментально полученными и расчётными соб-

ственными частотами сократилось и составило менее 1% при  $f < 200$  Гц и 5...7% для диапазона  $f = 200...900$  Гц. Полученные результаты подтверждают адекватность созданной численной модели диффузно-рассеивающего элемента, а также возможность её использования при прогнозировании работы цифрового спекл-интерферометра в условиях внешнего вибрационного возмущения.

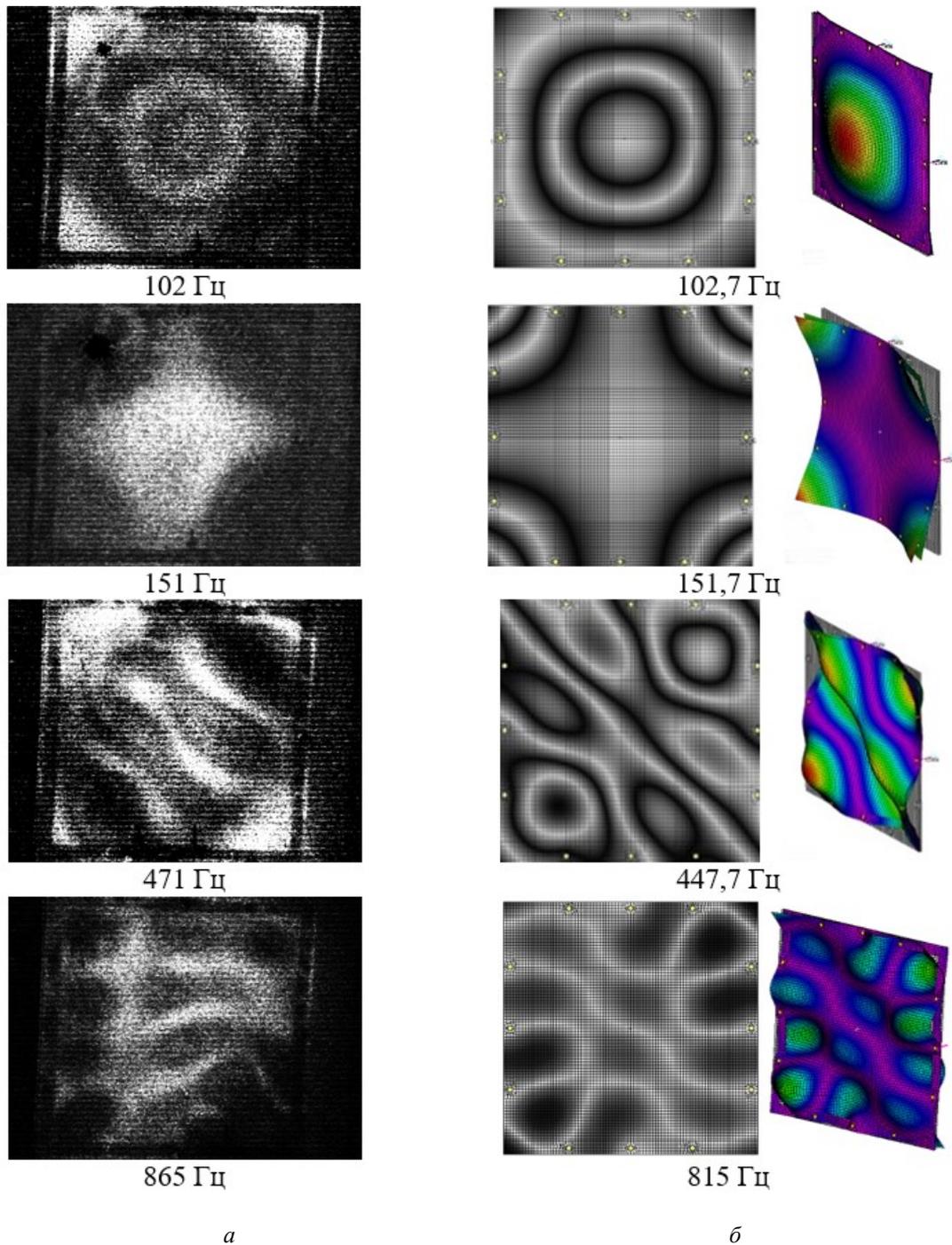


Рис. 8. Сравнение характерных форм колебаний диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра, прикреплённого к опорной плите на шпильках:  
а – эксперимент; б – результаты расчёта методом конечных элементов  
Толщина оргстеклянной пластины диффузно-рассеивающего элемента  $h = 5$  мм

Несмотря на то, что вибрационные характеристики, приведённые в данной работе, были получены для плоского диффузно-рассеивающего элемента, являющегося составной частью цифрового спекл-интерферометра [24], отработанная методика исследования может быть распространена для исследования целого класса оптически прозрачных деталей, изготавливаемых из оргстекла и пластика [19; 42]. Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на получение вибрационных характеристик оптических элементов со сложными криволинейными поверхностями, включающие выпуклые, вогнутые и асферические участки. Для этого целесообразно использовать модифицированную интерференционную установку, способную определять все три компонента вектора вибросмещения поверхности [29].

### **Заключение**

Предложена и апробирована методика бесконтактного определения собственных форм и частот колебаний прозрачных элементов оптических систем, основанная на нанесении на их поверхность неразрушающего легкоудаляемого диффузно-рассеивающего покрытия и последующей записи интерферограмм при помощи спекл-интерферометра с совмещёнными опорным и предметным пучками и диффузно-рассеивающим элементом в качестве светоделителя. При этом роль светоделителя выполняет сам объект исследования, а в оптической схеме спекл-интерферометра предметный пучок диффузно отражается от вибрирующей поверхности оптического элемента, тогда как опорный пучок формируется в результате рассеяния света от неподвижной плиты расположенной непосредственно за диффузно-рассеивающим элементом. Экспериментально показана возможность регистрации этим способом качественных интерферограмм, достаточных для получения количественной информации о полях вибросмещения поверхности крупногабаритных прозрачных оптических элементов без виброизоляции спекл-интерферометра.

При отработке режимов записи интерферограмм колеблющегося диффузно-рассеивающего элемента установлено, что наибольший контраст интерференционных полос достигается при прозрачности нанесённого покрытия  $\tau_c = 43...63\%$ . Применение покрытий с  $\tau_c > 63\%$  сопровождается снижением видности интерференционных полос высокого порядка. Использование оптически плотных рассеивающих покрытий с  $\tau_c < 43\%$  приводит к уширению интерференционных полос, что затрудняет получение достоверной количественной информации о колебаниях объекта.

Разработанная экспериментальная методика была успешно использована для коррекции результатов численного моделирования, описывающих колебания диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра с габаритами оргстеклянной пластины  $410 \times 410 \times 5$  мм. Это обеспечило рассогласование экспериментальных и расчётных данных для выявленных форм колебаний в пределах  $5...7\%$  по уровню собственных частот в диапазоне до 900 Гц. В дальнейшем созданная модель найдет применение для моделирования процесса возникновения дополнительной разности хода под действием распространяющихся механических возмущений в оптической схеме спекл-интерферометра, что позволит установить новые возможности по повышению помехоустойчивости во время записи спекл-интерферограмм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-10066.

### **Библиографический список**

1. Золотов А.А., Титов М.И. Обеспечение надёжности транспортных аппаратов космических систем. М.: Машиностроение, 1988. 215 с.
2. Гишваров А.С. Совмещённые ресурсные испытания технических систем. Уфа: АН РБ, Гилем, 2002. 268 с.
3. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надёжности: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 304 с.
4. Федорченко Д.Г., Кочеров Е.П. Прочностная доводка и устранение основных дефектов ГТД. Самара: Издатель Исакова Т.С. (БИЮР), 2022. 431 с.
5. Форрест П. Усталость металла. М.: Машиностроение, 1968. 352 с.
6. Крюков С.В. Вибродиагностика технического состояния деталей ГТД на основе исследования их собственных форм колебаний. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2007, 164 с.
7. Бабаев А.А. Амортизация, демпфирование и стабилизация бортовых оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1984. 232 с.
8. Телепнев П.П., Кузнецов Д.А., Герасимчук В.В., Ефанов В.В. Обоснование требований к проектным параметрам элементов конструкции космического аппарата на основе динамического анализа переходных процессов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 2 (60). С. 13-20. DOI: 10.26162/LS.2023.60.2.002
9. Xing W., Tuo W., Li X., Wang T., Yang C. Micro-vibration suppression and compensation techniques for in-orbit satellite: A review // Chinese Journal of Aeronautics. 2024. V. 37, Iss. 9. DOI: 10.1016/j.cja.2024.05.036
10. Haghshenas J. Vibration effects on remote sensing satellite images // Advances in Aircraft and Spacecraft Science. 2017. V. 4, Iss. 5. P. 543-553. DOI: 10.12989/aas.2017.4.5.543
11. Qin C., Xu Z., Xia M., He S., Zhang J. Design and optimization of the micro-vibration isolation system for large space telescope // Journal of Sound and Vibration. 2020. V. 482. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115461
12. Телепнев П.П., Жиряков А.В., Герасимчук В.В. Проектный расчёт уровня вибронгруженности элементов конструкций КА методом динамического анализа // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 1 (47). С. 13-18. DOI: 10.26162/LS.2020.47.1.002
13. Zhang Y., Sheng C., Hu Q., Li M., Guo Z., Qi R. Dynamic analysis and control application of vibration isolation system with magnetic suspension on satellites // Aerospace Science and Technology. 2018. V. 75. P. 99-114. DOI: 10.1016/j.ast.2017.12.041
14. Телепнев П.П., Кузнецов Д.А. Методы виброзащиты прецизионных космических аппаратов. Химки: Издатель АО «НПО Лавочкина», 2019. 263 с.
15. Справочник конструктора оптико-механических приборов / под ред. М.Я. Кругера, В.А. Панова. Л.: Машиностроение, 1967. 760 с.
16. Malacara D., Malacara Z. Handbook of optical design. New York: Marcel Dekker, 2004. 522 p.
17. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.
18. Ryaboy V.M. Vibration control for optomechanical systems. Singapore: World Scientific, 2021. 280 p.
19. Справочник технолога-оптика / под ред. М.А. Окатова. СПб: Политехника, 2004. 679 с.
20. Gerhard C. Optics manufacturing. Components and systems. New-York: CRC Press, 2018. 309 p.

21. Ghareab D., Ibrahim A. Optical metrology with interferometry. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publ., 2019. 312 p.
22. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 252 с.
23. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
24. Ivchenko A.V., Zhuzhukin A.I. The system development for digital recording of speckle-interferograms of an oscillating object without vibration isolation // Proceedings of the International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2020 (September, 16-18, 2020, Samara, Russia). DOI: 10.1109/dvm49764.2020.9243896
25. Ivchenko A.V., Safin A.I. The technique improvement for GTE-wheel oscillation recording by the noise-proof digital speckle pattern interferometer // Proceedings of the International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2022 (September, 21-23, 2022, Samara, Russia). DOI: 10.1109/dvm55487.2022.9930910
26. Жужукин А.И., Непеин К.Г. Спекл-интерферометрическая установка для исследования частот и форм колебаний рабочих колёс турбомашин // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 4 (124). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-4-2169
27. Жужукин А.И. Устройство для исследования форм колебаний: патент РФ № 71429; опубл. 10.03.2008; бюл. № 7.
28. Ивченко А.В., Сафин А.И. Исследование влияния широкополосных механических возмущений на качество записи интерферограмм колебаний рабочего колеса ГТД при использовании цифрового спекл-интерферометра панорамного типа // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 1. С. 160-176. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-160-176.
29. Журавлев О.А., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д., Комаров С.Ю. Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций. Самара: Изд-во СГАУ, 2005. 193 с.
30. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. A discussion of the theory, practice and application of the techniques. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 330 p.
31. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 222 с.
32. Brock J.R. A note on the Beer-Lambert law // Analytica Chimica Acta. 1962. V. 27. P. 95-97. DOI: 10.1016/S0003-2670(00)88457-3
33. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде FemapwithNXNastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.
34. Негматов С.С., Пак И.И. Демпфирующие свойства полимерных материалов и покрытий на их основе. Обзор. Ташкент: УзНИНТИ, 1974. 26 с.
35. Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник. Киев: Наукова Думка, 1982. 287 с.
36. Головкин С.А., Пушкар А., Левин Д.М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. 191 с.
37. Shakhmatov E.V., Zhuravlev O.A., Sergeev R.N., Safin A.I. Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb // Procedia Engineering. 2015. V. 106. P. 247-252. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.031
38. Moeller K.D. Optics. Learning by computing, with examples using MathCad®, Matlab®, Mathematica®, and Maple®. New York: Springer-Verlag, 2007. 455 p. DOI: 10.1007/978-0-387-69492-4
39. Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969. 592 с.

40. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
41. Chicharro J.M., Bayon A., Salazar F. Measurement of damping in magnetic materials by optical heterodyne interferometry // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2004. V. 268, Iss. 3. P. 348-356. DOI: 10.1016/s0304-8853(03)00546-8
42. Handbook of plastic optics / ed. by S. Bäumer. Darmstadt: Wiley, 2006. 199 p.

## INVESTIGATION OF VIBRATION MODES FOR OPTICALLY TRANSPARENT COMPONENTS BY USING DIGITAL SPECKLE INTERFEROMETRY AND FINITE ELEMENT METHOD

© 2025

- A. V. Ivchenko** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Engine Production Department;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[fgrt@yandex.ru](mailto:fgrt@yandex.ru)
- A. I. Zhuzhukin** Candidate of Science (Engineering), Senior Scientist of the Research Institute of Machine Acoustics;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[cntkknio@yandex.ru](mailto:cntkknio@yandex.ru)
- R. N. Sergeev** Engineer of the Research Institute of Machine Acoustics;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[romansr@yandex.ru](mailto:romansr@yandex.ru)
- A. I. Safin** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Automatic Systems of Power Plants;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[safin.ai@ssau.ru](mailto:safin.ai@ssau.ru)

An experimental method for studying the natural vibration modes of the acting faces of large-sized optically-transparent components used in the imaging and interference systems in optical-electronic sets is proposed. Based on a noise-proof digital pattern speckle interferometer, an optical system was developed to provide the registration of the normal component of the vibration displacement vectors on the flat optical surface with the deposited diffusing coating. The optimal transmission of the coating was determined for recording the contrast speckle-interferograms. The vibration modes of the flat, diffusing element included in the digital speckle pattern interferometer are investigated in order to verify the results of numerical modeling of its vibrations at resonant frequencies. For natural vibration modes recorded in the range from 0 to 900 Hz, deviations between experimental and numerical results within 5...7% were found.

*Optical component; excitation; speckle-interferometer; method; registration; vibration; vibration displacement; natural frequencies and vibration modes of structure*

---

*Citation:* Ivchenko A.V., Zhuzhukin A.I., Sergeev R.N., Safin A.I. Investigation of vibration modes for optically transparent components by using digital speckle interferometry and finite element method. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 1. P. 114-130. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-114-130

### References

1. Zolotov A.A., Titov M.I. *Obespechenie nadezhnosti transportnykh apparatov kosmicheskikh sistem* [Reliability control for tugs of space systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 215 p.
2. Gishvarov A.S. *Sovmeshchennye resursnye ispytaniya tekhnicheskikh sistem* [Combined life cycle tests of technical systems]. Ufa: AN RB, Gilem Publ., 2002. 268 p.

3. Kuznetsov N.D., Tseytlin V.I., Volkov V.I. *Tekhnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti: spravochnik* [Technological methods for reliability improvement: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 304 p.
4. Fedorchenko D.G., Kocherov E.P. *Prochnostnaya dovodka i ustraneniye osnovnykh defektov GTD* [Strength development and elimination of the main defects of gas turbine engines]. Samara: Isakova T.S. (BIYuR) Publ., 2022. 431 p.
5. Forrest P.G. *Fatigue of metals*. Paris: Pergamon Press, 1962. 436 p.
6. Kryukov S.V. *Vibrodiagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya detaley GTD na osnove issledovaniya ikh sobstvennykh form kolebaniy. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Vibration diagnostics of the technical condition of gas turbine engine parts based on the study of their natural vibration modes. Thesis for a Candidate Degree in Science (Engineering)]. Rybinsk, 2007. 164 p.
7. Babaev A.A. *Amortizatsiya, dempfirovaniye i stabilizatsiya bortovykh opticheskikh priborov* [Shock absorption, damping and stabilization of on-board optical instruments]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1984. 232 p.
8. Telepnev P.P., Kuznetsov D.A., Gerasimchuk V.V., Efanov V.V. Substantiation of requirements for design parameters of spacecraft structural elements based on dynamic analysis of transients. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*. 2023. No. 2 (60). P. 13-20. (In Russ.). DOI: 10.26162/LS.2023.60.2.002
9. Xing W., Tuo W., Li X., Wang T., Yang C. Micro-vibration suppression and compensation techniques for in-orbit satellite: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024. V. 37, Iss. 9. DOI: 10.1016/j.cja.2024.05.036
10. Haghshenas J. Vibration effects on remote sensing satellite images. *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*. 2017. V. 4, Iss. 5. P. 543-553. DOI: 10.12989/aas.2017.4.5.543
11. Qin C., Xu Z., Xia M., He S., Zhang J. Design and optimization of the micro-vibration isolation system for large space telescope. *Journal of Sound and Vibration*. 2020. V. 482. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115461
12. Telepnev P.P., Zhiryakov A.V., Gerasimchuk V.V. Design calculation of the vibration load level of spacecraft structural elements by dynamic analysis. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*. 2020. No. 1 (47). P. 13-18. (In Russ.). DOI: 10.26162/LS.2020.47.1.002
13. Zhang Y., Sheng C., Hu Q., Li M., Guo Z., Qi R. Dynamic analysis and control application of vibration isolation system with magnetic suspension on satellites. *Aerospace Science and Technology*. 2018. V. 75. P. 99-114. DOI: 10.1016/j.ast.2017.12.041
14. Telepnev P.P., Kuznetsov D.A. *Metody vibrozashchity pretsizionnykh kosmicheskikh apparatov* [Methods for vibration protection of precision spacecraft]. Khimki: Lavochkin Associacion Publ., 2019. 263 p.
15. *Spravochnik konstruktora optiko-mekhanicheskikh priborov / pod red. M.Ya. Krugera, V.A. Panova* [Handbook of the designer of opto-mechanical instruments. Second edition, revised and supplemented]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1967. 760 p.
16. Malacara D., Malacara Z. *Handbook of optical design*. New York: Marcel Dekker, 2004. 522 p.
17. Ostrovskiy Yu.I., Butusov M.M., Ostrovskaya G.V. *Golograficheskaya interferometriya* [Holographic interferometry]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 339 p.
18. Ryaboy V.M. *Vibration control for optomechanical systems*. Singapore: World Scientific, 2021. 280 p.
19. *Spravochnik tekhnologa-optika / pod red. M.A. Okatova* [Optics engineer's handbook]. Saint Petersburg: Politehnika Publ., 2004. 679 p.
20. Gerhard C. *Optics manufacturing. Components and systems*. New-York: CRC Press, 2018. 309 p.

21. Ghareab D., Ibrahim A. Optical metrology with interferometry. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publ., 2019. 312 p.
22. Guzhov V.I., Il'inykh S.P. *Komp'yuternaya interferometriya: ucheb. posobie* [Computer interferometry]. Novosibirsk: NSTU Publ., 2004. 252 p.
23. Francon M. La granularite laser (spekle) et ses applications en optique. Paris: Masson, 1978. 132 p.
24. Ivchenko A.V., Zhuzhukin A.I. The system development for digital recording of speckle-interferograms of an oscillating object without vibration isolation. *Proceedings of the International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2020 (September, 16-18, 2020, Samara, Russia)*. DOI: 10.1109/dvm49764.2020.9243896
25. Ivchenko A.V., Safin A.I. The technique improvement for GTE-wheel oscillation recording by the noise-proof digital speckle pattern interferometer. *Proceedings of the International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2022 (September, 21-23, 2022, Samara, Russia)*. DOI: 10.1109/dvm55487.2022.9930910
26. Zhuzhukin A.I., Nepein K.G. Speckle interferometry setup for studying the frequencies and modes of vibrations of turbo-machine rotor wheels. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2022. No. 4 (124). (In Russ.) DOI: 10.18698/2308-6033-2022-4-2169
27. Zhuzhukin A.I. *Ustroystvo dlya issledovaniya form kolebaniy* [Device for studying vibration modes]. Patent RF, no. 71429, 2008. (Publ. 10.03.2008, bull. no. 7)
28. Ivchenko A.V., Safin A.I. Investigation of the influence of broadband mechanical disturbances on the quality of recording interference patterns of GTE-wheel oscillations using a digital speckle pattern interferometer. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 1. P. 160-176. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-160-176
29. Zhuravlev O.A., Shaposhnikov Yu.N., Shcheglov Yu.D., Komarov S.Yu. *Primenenie metodov golograficheskoy i spekl-interferometrii dlya issledovaniya vibratsii i shuma mekhanicheskikh konstruktsiy* [Application of holographic and speckle interferometry methods for studying vibration and noise of mechanical structures]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2005. 143 p.
30. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. A discussion of the theory, practice and application of the techniques. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 330 p.
31. Klimenko I.S. *Golografiya sfokusirovannykh izobrazheniy i spekl-interferometriya* [Focused image holography and speckle interferometry]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 222 p.
32. Brock J.R. A note on the Beer-Lambert law. *Analytica Chimica Acta*. 1962. V. 27. P. 95-97.
33. Rychkov S.P. *Modelirovanie konstruktsiy v srede FemapwithNXNastran* [Modeling structures under Femap with NX Nastran environment]. Moscow: DMK Press Publ., 2013. 784 p.
34. Negmatov S.S., Pak I.I. *Dempfiruyushchie svoystva polimernykh materialov i pokrytiy na ikh osnove. Obzor* [Damping properties of polymeric materials and coatings based on them. Review]. Tashkent: UZNINTI Publ., 1974. 26 p.
35. Frantsevich I.N., Voronov F.F., Bakuta S.A. *Uprugie postoyannye i moduli uprugosti metallov i nemetallov. Spravochnik* [Elastic constants and elastic moduli of metals and non-metals. Handbook]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1982. 287 p.
36. Golovkin S.A., Pushkar A., Levin D.M. *Uprugie i dempфирuyushchie svoystva konstruktsionnykh metallicheskih materialov* [Elastic and damping properties of structural metallic materials]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1987. 191 p.

37. Shakhmatov E.V., Zhuravlev O.A., Sergeev R.N., Safin A.I. Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb. *Procedia Engineering*. 2015. V. 106. P. 247-252. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.031

38. Moeller K.D. Optics. Learning by computing, with examples using MathCad®, Matlab®, Mathematica®, and Maple®. New York: Springer-Verlag, 2007. 455 p. DOI: 10.1007/978-0-387-69492-4

39. Ivanov A.P. *Optika rasseivayushchikh sred* [Optics of scattering media]. Minsk: Nauka i Tekhnika Publ., 1969. 592 p.

40. Biderman V.L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Theory of mechanical vibrations]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1980. 408 p.

41. Chicharro J.M., Bayon A., Salazar F. Measurement of damping in magnetic materials by optical heterodyne interferometry. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2004. V. 268, Iss. 3. P. 348-356. DOI: 10.1016/s0304-8853(03)00546-8

42. Handbook of plastic optics / ed. by S. Bäumer. Darmstadt: Wiley, 2006. 199 p.