

На правах рукописи

Савонин Сергей Александрович

**МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОЙ КОРРЕКЦИОННОЙ  
ПОСТОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЦИФРОВОЙ  
ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»  
и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте проблем точной механики и управления Российской академии наук

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор  
**Рябухо Владимир Петрович**

**Официальные оппоненты:** директор НТЦ «Оптоэлектроника»  
ФГБОУ ВО «Московский  
государственный машиностроительный  
университет (МАМИ)»,  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Каленков Сергей Геннадьевич**

профессор кафедры «Математика и  
моделирование» ФГБОУ ВО «Саратовский  
государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.»,  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Паршков Олег Михайлович**

**Ведущая организация:** Саратовский филиал  
ФГБУН «Институт радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН»,  
г. Саратов

Защита состоится 17 мая 2016 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.243.05 на базе ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по адресу:  
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корп. 3, ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», а также на сайте:  
<http://www.sgu.ru/research/dissertation-council/d-212-243-05/kandidatskaya-dissertaciya-savonina-sergeya-0>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, профессор



В.Л. Дербов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Голография – метод регистрации волнового поля световой волны, отраженной от исследуемого объекта или прошедшей через него, с возможностью последующей реконструкции этого поля. Информация о волновом поле фиксируется в виде голограммы, которая является результатом записи на специализированном носителе несущей голограммной структуры – картины интерференции объектной и опорной волн. Возможность регистрации пространственных фазовых распределений волнового объектного поля предопределяет широкое использование голографии при проведении фазовых измерений объектов различной природы, испытывающих изменения во времени – метод голографической интерферометрии, в котором осуществляется сравнение волновых полей, прошедших по одному оптическому пути в разные моменты времени. Это позволяет исследовать объекты произвольной структуры и формы, включая исследования с точностью до долей микрометра полей микросмещений поверхностей объектов с рассеивающей оптически негладкой поверхностью.

Качественный скачок в развитии методов и техники голографии произошел с широким внедрением матричных фотоэлектрических детекторов. Формирование картины интерференции опорного и объектного волновых полей на светочувствительной матрице позволило осуществить в цифровой форме как процедуру записи голограммы, в виде сохранения растрового изображения в памяти компьютера, так и реконструкцию объектного волнового поля в численном виде путем компьютерной обработки цифровой голограммы. Такая технология получила название «цифровой голографии» [U. Schnars, *Appl. Opt.* (1994); L. Yaroslavsky, *Springer* (2004)]. Применение дифракционных интегральных преобразований к записанной цифровой голограмме позволяет в численном виде восстановить математический образ объектного волнового поля в матричной форме (как массив комплексных амплитуд объектного поля) и визуализировать его в виде изображения объекта. При этом сложение матриц комплексных амплитуд, полученных с цифровых голограмм одного объекта в разные моменты времени, позволяет сформировать в численном виде цифровую голографическую интерферограмму и реализовать метод цифровой голографической интерферометрии. Высокие частотные параметры современных цифровых матричных фотоприемников обеспечивают возможность последовательной записи большого набора цифровых голограмм за короткий интервал времени, что позволяет осуществить на практике метод многоэкспозиционной голографической интерферометрии и эффективно решать задачи по контролю динамических процессов [D.N. Borza, *Meas. Sci. Technol.* (2005); М.Е. Гусев, *Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика* (2014)], характеризующихся значительными градиентами измеряемых величин (изгибные деформации и вибрационные процессы, температурные деформации, диффузионные процессы в прозрачных средах и т.д.).

На настоящее время методы цифровой голографической интерферометрии нашли активное применение при решении широкого круга задач по анализу деформационных процессов в объектах и контролю их формы [C. Kohler, *Appl. Opt.* (2010); G. Pedrini, *Chin. Opt. Lett.* (2009); I. Yamaguchi, *Appl. Opt.* (2006)], в выявлении особенностей пространственного распределения показателя преломления и исследовании процессов массопереноса в прозрачных средах [M.H. Jericho, *Appl. Opt.* (2012); S.-H. Shin, *J. Opt. Soc. Korea* (2009)], в микроскопии и методах визуализации частиц [S.G. Kalenkov, *Opt. Express* (2013); N. Verrier, *Appl. Opt.* (2015)]. Развиваются голографические методы реконструкции структуры трехмерных объектов [P. Memmolo, *Cytometry A* (2014); M. Grosse, *Opt. Lett.* (2010)]. Информационная роль цифровых голограмм находит отражение в методах шифрования и дешифрования информации [C. Lin, *Appl. Opt.* (2013)]. Особую роль играет

оптимизация экспериментальной техники записи цифровых голограмм и усовершенствование алгоритмов реконструкции с голограмм численных образов волновых полей [S. Zhang, *Opt. Commun.* (2014); F.A. Monroy, *Optik* (2010)], направленных на повышение разрешения формируемых в методе цифровой голографии изображений. Важное место в развитии цифровой голографической интерферометрии и методов обработки оптической информации занимает проблема численной коррекции искажений [H. Jiang, *Opt. Express* (2009); S.T. Thurman, *JOSA A* (2008)], вносимых как на этапе регистрации несущей голограммной структуры за счет технических ограничений матричных фотодетекторов и особенностей постановки эксперимента, так и при численной реконструкции с голограммы волнового поля путем расчета дискретных дифракционных преобразований.

В общем случае, численная технология метода цифровой голографии подразумевает возможность разработки специализированных коррекционных алгоритмов, направленных на оптимизацию процедур записи цифровых голограмм и процедур реконструкции с них волновых полей, и позволяет на любом этапе голографического восстановления образа объектного поля вносить в него численные изменения с целью устранения экспериментальных и вычислительных погрешностей, повышения разрешения изображений и достижения дополнительных возможностей при количественном анализе параметров и свойств исследуемых объектов. Практическая реализация таких коррекционных процедур является актуальной, что и определило тематику, цель и задачи настоящей работы.

**Цель диссертационной работы** состояла в разработке численных коррекционных методов постобработки цифровых голограмм для повышения пространственного разрешения и точности количественного анализа фазовых распределений, а также достижения новых возможностей по их визуализации, при исследовании диффузно-отражающих и фазовых объектов.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

- Теоретическая разработка и практическая реализация математической модели распределения интенсивности излучения на голографической интерферограмме с учетом спекл-модуляции в поле изображения объекта и фазовых распределений в освещающем объект лазерном пучке.
- Разработка математических моделей и алгоритмов численной коррекционной постобработки голограмм, направленных на устранение фазовых сдвигов в поле микроперемещения поверхности объекта, вызванных его микросмещениями как целого.
- Анализ пространственно-временных измерительных возможностей цифрового лазерного голографического контроля динамического поля микроперемещений поверхности рассеивающего объекта.
- Исследование возможностей повышения контраста интерференционных изображений посредством численной постобработки записанных голограмм на этапах расчета их спектра и его пространственно-частотной фильтрации.
- Разработка метода численной голографической постобработки интерферограмм в частично-когерентном свете и его реализация при исследовании фазовых микрообъектов.
- Разработка цифрового голографического метода пространственно-высокоразрешающего контроля процессов массопереноса в микрообъемах прозрачных систем.

**Научная новизна диссертационной работы:**

- Получены аналитические выражения и разработана математическая модель распределения интенсивности света на спекл-модулированных голографических интерферограммах деформаций поверхности трехмерного диффузно-рассеивающего

объекта и сопутствующих им микросмещений объекта как целого в методе цифровой голографической интерферометрии.

- Предложен и экспериментально подтвержден метод корректирующей постобработки в цифровой голографической интерферометрии нагруженных диффузно-рассеивающих объектов, заключающийся в численном внесении дополнительной разности фаз в комплексную амплитуду объектного поля деформированного состояния объекта с целью устранения на интерферограммах систем сторонних полос, соответствующих вносимым в эксперименте недеформационным микросмещениям объекта как целого.

- Получены оценки на максимальные величины параметров динамического поля микроперемещений поверхности объекта, контролируемые методом голографической интерферометрии, при использовании цифрового матричного фотоприемника с заданными пространственными и временными частотными характеристиками.

- Установлено влияние геометрии оптической схемы записи цифровой голограммы на чувствительность метода голографической интерферометрии к поступательным микросмещениям объекта в различных направлениях.

- Предложен новый вычислительно-эффективный метод повышения контраста полос в цифровой голографической интерферометрии, основанный на применении к записанным голограммам процедуры ступенчатой интерполяции на этапе расчета их пространственного спектра.

- Разработаны теоретические основы и реализован в эксперименте голографический метод численного представления пространственного распределения комплексных амплитуд объектного поля и трехмерной визуализации микрорельефа поверхности микрообъекта в интерференционной микроскопии в частотно-широкополосном частично-когерентном свете.

- Представлен метод пространственно высокоразрешающего контроля быстропротекающих микропроцессов, характеризующихся большими градиентами показателя преломления, основанный на технике многоэкспозиционной голографической микроскопии с применением численных процедур повышения контраста и разрешения высокочастотных интерференционных полос.

### **Научная и практическая значимость работы**

Результаты диссертационной работы развивают теоретические и экспериментальные основы численных методов цифровой голографической интерферометрии, применяемых при определении полей микроперемещений и микродеформаций отражающих диффузно-рассеивающих объектов и расчете пространственных фазовых распределений в прозрачных средах.

Предложенная математическая модель формирования спекл-модулированных интерферограмм дает возможность в численном эксперименте оценить параметры пространственной структуры полос на интерферограммах деформационных микроперемещений поверхности диффузно-рассеивающих объектов под действием внешних возмущающих сил различной природы при произвольной геометрии оптической схемы записи цифровых голограмм и различных пространственных распределениях фазы в освещающем объект световом пучке. Результаты численного эксперимента могут использоваться при оценке корректности постановки и интерпретации результатов натурального эксперимента при контроле изгибных деформаций нагруженных объектов методом цифровой голографической интерферометрии.

Метод численной коррекционной постобработки интерферограмм может успешно применяться при голографическом контроле полей деформационных микроперемещений точек поверхности трехмерных объектов с рассеивающей поверхностью (деталей, конструкций и узлов различного технического назначения), находящихся под действием

внешних деформирующих нагрузок. Разработанные алгоритмы позволяют повысить точность количественного анализа полей деформации поверхности объекта, при решении обратной задачи интерферометрии, за счет численного устранения фазовых вкладов в объектное поле от недеформационных микроперемещений объекта (микронаклонов и микросмещений как целого), что дает возможность сформировать интерферограмму, отражающую только фазовый вклад, определяемый деформационными смещениями.

Разработанные алгоритмы повышения контраста интерферограмм путем численной постобработки цифровых голограмм и их спектров расширяют метрологические возможности метода голографической интерферометрии и дают возможность повысить точность количественного анализа пространственных фазовых распределений объектных полей при решении практических задач по контролю диффузно-отражающих и прозрачных объектов технического и биологического происхождения.

Предложенный метод численной голографической постобработки цифровых интерферограмм расширяет технические возможности интерференционной микроскопии за счет возможности трехмерной визуализации микрорельефа поверхности микрообъектов и может найти эффективное применение при определении морфологических и морфометрических параметров микрообъектов при цитологических и гистологических исследованиях. Высокие пространственно-временные возможности метода цифровой голографической микроскопии могут найти практическое приложение при анализе диффузионных процессов в многокомпонентных системах, включая неинвазивные исследования с высоким пространственным разрешением процессов массопереноса лекарственных средств в биологических тканях и клетках.

### **Степень достоверности научных результатов**

Достоверность полученных в работе научных результатов и выводов обусловлена использованием широко применяемых на практике методов цифровой голографии, голографической интерферометрии и математического моделирования; адекватностью исследуемым физическим процессам формального теоретического аппарата, используемого для описания процессов формирования спекл-модулированных интерференционных изображений; корректностью применяемых численных алгоритмов и методов постобработки голограмм и интерферограмм; корректностью постановки натуральных и численных экспериментов; соответствием экспериментальных результатов теоретическим выводам и результатам математического моделирования.

### **Методология и методы исследования**

Теоретическая модель формирования спекл-модулированных голографических интерферограмм деформационного перемещения рассеивающей поверхности объекта разрабатывалась с применением скалярной теории дифракции. Расчет коррекционных фазовых множителей для компенсации микросмещений объектов как целого основывался на использовании методов математического моделирования и численного эксперимента в соответствии с разработанной теоретической моделью. Алгоритмы коррекционной постобработки голограмм и интерферограмм для повышения контраста интерференционных изображений разрабатывались с применением методов компьютерной обработки цифровых изображений и двумерного анализа Фурье. Алгоритм голографической обработки интерферограмм в частично-когерентном свете рассматривается в качестве расширения метода цифровой голографии сфокусированного изображения. Проверка истинности предложенных теоретических моделей и развиваемых численных методов постобработки осуществлялась путем проведения численных и натуральных экспериментов в соответствии с техникой цифровой голографии и голографической интерферометрии.

### **Основные результаты и положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель численного формирования спекл-модулированных интерференционных картин в цифровой голографической интерферометрии деформационных смещений диффузно-отражающих трехмерных объектов, с учетом вариаций геометрии оптической схемы записи голограммы и пространственного распределения фазы в освещающем объект лазерном пучке.

2. Метод численной коррекционной постобработки в цифровой голографической интерферометрии для повышения точности определения деформационных смещений поверхности диффузно-отражающих объектов путем устранения в восстанавливаемом объектном поле фазовых пространственных сдвигов, вносимых в эксперименте недеформационными микросмещениями объекта. Экспериментальная реализация численной коррекции фазовых сдвигов, вносимых микросмещениями объекта как целого в цифровой голографической интерферометрии деформационных смещений.

3. Численные алгоритмы апостериорной обработки цифровых голограмм на этапах расчета пространственного спектра голограмм и пространственно-частотной фильтрации спектральных компонент объектного поля с целью повышения степени корреляции комплексных амплитуд восстанавливаемых объектных полей и пространственного разрешения цифровой голографической интерферометрии диффузно-отражающих и прозрачных объектов.

4. Цифровая голографическая обработка интерферограмм сфокусированного изображения, получаемых в системах интерференционной микроскопии на отражение в частично-когерентном частотно-широкополосном излучении с малым радиусом пространственной когерентности, обеспечивает возможность восстановления в численной форме пространственного распределения комплексной амплитуды объектного поля в области пространственной локализации несущих интерференционных полос, с последующей трехмерной визуализацией микрорельефа поверхности исследуемого объекта.

5. Применение численной операции дополнения нулевыми значениями матрицы отфильтрованных объектных частотных компонент пространственного спектра голограммы и управление формой пятна разрешения в голографических интерферограммах путем подбора размеров и формы окна пространственно-частотной фильтрации обеспечивают возможность повышения разрешения пространственного контроля фазовых сред методом голографической интерференционной микроскопии.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы представлялись на Всероссийской научной школе-семинаре «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» (Саратов; 2010, 2011 гг.); Международной молодежной школе по оптике, лазерной физике и биофизике (Саратов; 2010, 2011 гг.); Международном симпозиуме по оптике и биофотонике (Саратов; 2014, 2015 гг.); Международном оптическом конгрессе «Оптика XXI век» (Санкт-Петербург; 2010 г.); XXVIII Школе-симпозиуме по голографии и когерентной оптике (Нижний Новгород; 2013 г.); Всероссийской научной конференции с международным участием «Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении» (Саратов; 2013 г.); Научно-технической конференции-семинаре по фотонике и информационной оптике (Москва; 2011 г.); Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике (Москва; 2012, 2014 гг.); Международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва; 2015, 2016 гг.).

По материалам диссертации опубликовано 19 печатных работ, в числе которых 4 – в рецензируемых журналах из списка ВАК, 15 публикаций в сборниках научных трудов и материалах всероссийских и международных конференций.

Исследования по теме диссертации проводились при частичной поддержке грантов: Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 гг.)» 2.1.1/4364, 2.1.1/4989, 2.2.1/2950; Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-703.2014.2 (2012-2013, 2014-2015 гг.).

### Личный вклад автора диссертации

Автором выполнено решение всего объема теоретических и практических задач исследования, поставленных профессором д.ф.-м.н. В.П. Рябухо. При определяющем участии автора проведено теоретическое обоснование и выполнен вывод аналитических выражений представленных в работе методов численной коррекционной постобработки, выполнена разработка всех математических моделей формирования интерференционных изображений, программ численной реконструкции изображений с цифровых голограмм, численных алгоритмов коррекционной постобработки голограмм и интерферограмм. Автор принимал непосредственное участие в разработке экспериментальных установок и проведении натуральных экспериментов. Обработка экспериментальных данных и численные эксперименты выполнены автором лично. Обсуждение результатов и формулировка выводов по диссертационной работе выполнены совместно с научным руководителем.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 230 страниц текста, в том числе 99 рисунков. Список использованных источников содержит 170 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** приведен краткий обзор основных этапов развития аналоговой голографической интерферометрии, обсуждаются предпосылки возникновения и особенности применения методов цифровой голографии и голографической интерферометрии, рассмотрены основные направления их практического применения. Обоснована актуальность темы исследования, определены его цель и задачи, изложены научная новизна и практическая значимость работы, положения и результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлены результаты исследований, связанных с теоретической разработкой и реализацией математической модели формирования голографических интерферограмм микроперемещений поверхности отражающих объектов с учетом эффектов спекл-модуляции в поле изображения объекта.

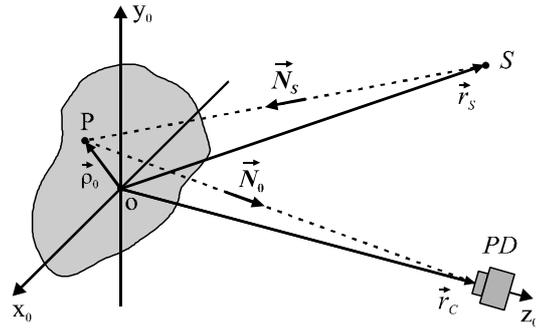
При численном моделировании распределения интенсивности света на голографической интерферограмме, когда источник излучения, освещающего поверхность объекта, находится на конечном расстоянии от объекта, необходимо учитывать кривизну волнового фронта освещающей волны. При этом векторы направлений освещения  $\vec{N}_S$  и наблюдения  $\vec{N}_0$  изменяются при переходе от точки к точке по поверхности объекта (рис. 1). В предположении, что источник  $S$  освещающей волны длиной  $\lambda$  расположен в точке пространства с радиус-вектором  $\vec{r}_S(x_S, y_S, z_S)$ , а центр апертуры камеры (точка наблюдения) задается вектором  $\vec{r}_C(x_C, y_C, z_C)$ , для пространственного распределения разности фаз объектных полей в плоскости регистрации получено выражение:

$$\Delta\varphi_S(\vec{\rho}_0) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \left( \frac{x_C - x_0}{A_{N0}} - \frac{x_0 - x_S}{A_{NS}} \right) \left( \frac{y_C - y_0}{A_{N0}} - \frac{y_0 - y_S}{A_{NS}} \right) \left( \frac{z_C - z_0}{A_{N0}} - \frac{z_0 - z_S}{A_{NS}} \right) \right] \begin{bmatrix} g_x(\vec{\rho}_0) \\ g_y(\vec{\rho}_0) \\ g_z(\vec{\rho}_0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $g_x(\vec{\rho}_0)$ ,  $g_y(\vec{\rho}_0)$ ,  $g_z(\vec{\rho}_0)$  – проекции вектора микроперемещения точек поверхности объекта;

$$A_{NS} = \left( (x_0 - x_S)^2 + (y_0 - y_S)^2 + (z_0 - z_S)^2 \right)^{1/2}, \quad A_{N0} = \left( (x_C - x_0)^2 + (y_C - y_0)^2 + (z_C - z_0)^2 \right)^{1/2}.$$

Рис. 1. Схема направлений освещения и наблюдения различных точек поверхности объекта



Учет кривизны волнового фронта освещающей волны позволил отразить в моделируемых картинах интерференционных полос фазовый вклад от поступательных микросмещений объектов в плоскостях, поперечных вектору разности направлений наблюдения и освещения  $\vec{K} = (2\pi/\lambda)(\vec{N}_0 - \vec{N}_S)$  (вектору чувствительности).

С целью учета в математической модели спекл-модуляции в изображении диффузно-рассеивающих объектов проведен теоретический анализ процесса формирования изображения объекта в линзовой системе и разработан алгоритм численной реализации спекл-модуляции в поле изображения объекта в лазерном свете. Алгоритм заключается в вычислении граничного поля  $U_b(x_0, y_0)$  (непосредственно около поверхности объекта), в его дифракционном преобразовании, связанным с распространением до изображающей линзы, в последующем учете фазовой трансформации поля линзой и во вторичном дифракционном преобразовании, определяющим распространение оптического поля от линзы до плоскости формирования изображения объекта. При этом комплексный коэффициент отражения объекта  $\tau(\vec{\rho}_0)$ , учитывающий обусловленную рассеянием случайную амплитудную и фазовую модуляцию освещающей волны, задавался в модели как гауссова случайная переменная (его модуль задавался как случайная величина с релеевской плотностью распределения, а фаза предполагалась распределенной равномерно в основном интервале  $[-\pi; \pi]$ ).

Численные смещения точки наблюдения объекта из плоскости формирования резкого изображения, при расчете в математической модели распространения света в оптической системе, позволяет осуществить процедуру дефокусировки изображения объекта (путем пересчета дополнительного набега фазы в оптическом поле). При увеличении расстояния от плоскости формирования резкого изображения происходит размытие границ отдельных элементов в изображении объекта, нарушение их целостности, что приводит к ограничениям в идентификации и расшифровке формируемого изображения (рис. 2).

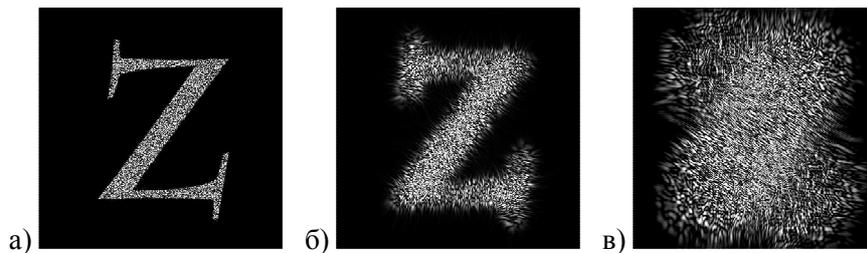


Рис. 2. Дефокусировка в изображении объекта при смещении плоскости регистрации вдоль оптической оси: а) в плоскости формирования резкого изображения; б) сдвиг на 10 мм в направлении от объекта; в) сдвиг на 40 мм от объекта

В математической модели, аналогично натурному эксперименту, при численном расчете и формировании сфокусированного изображения объекта форма и размер

апертуры изображающей оптической системы определяют структуру картины спеклов в численно-формируемом изображении (рис. 3), что оказывает влияние на разрешение изображений объектов.

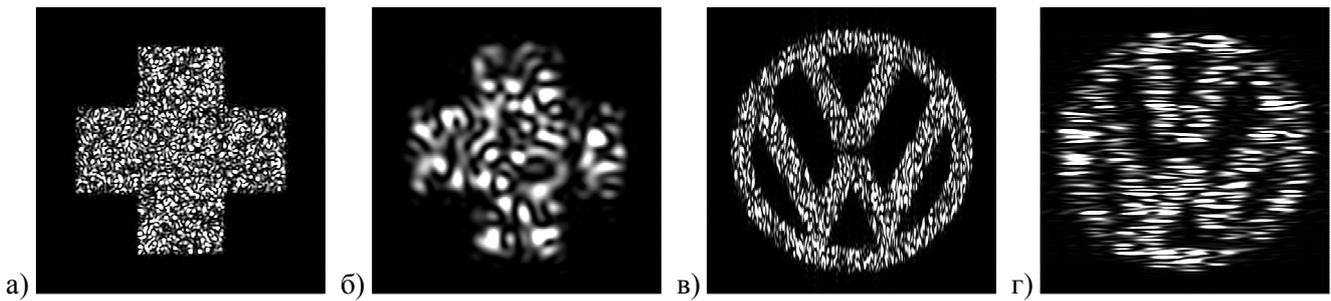


Рис. 3. Влияние формы и размера апертуры объектива на спекл-модуляцию в изображении объекта: а) круглая апертура, диаметр  $D=4$  мм, поперечный размер спеклов  $B \approx 41,7$  мкм; б) круглая,  $D=1$  мм,  $B \approx 166,8$  мкм; в) щелевая горизонтальная,  $l_x \times l_y = 6 \times 1,5$  мм,  $B_x \times B_y \approx 27,6 \times 110,5$  мкм; г) щелевая вертикальная,  $l_x \times l_y = 0,5 \times 4$  мм,  $B_x \times B_y \approx 333,5 \times 41,7$  мкм

Значительное влияние на контраст интерференционной картины оказывает форма спеклов спекл-модулированных интерферограмм процессов деформации рассеивающих объектов. Алгоритм численного формирования таких интерферограмм заключается в построении комплексных амплитуд полей рассеяния объекта в исходном состоянии  $U_1^0(x_0, y_0)$  и после деформации  $U_2^0(x_0, y_0)$ . Далее поля распространяются в оптической системе к плоскости формирования изображения, что выражается в их дифракционном преобразовании, с учетом пространственных ограничений, определяемых формой апертуры формирующей изображение линзы. При этом вычисляются два комплексных объектных поля изображения объекта  $U_1(x, y)$  и  $U_2(x, y)$ . Они характеризуют деформации, которые объект претерпел – квадрат модуля суммы таких объектных полей позволяет сформировать интерферограмму, отражающую деформации в объекте.

Влияние формы и размера апертуры изображающей оптической системы на контраст интерференционной картины проанализирован при моделировании спекл-модулированных интерферограмм процесса равномерного расширения шара вдоль нормали к своей поверхности (точка опоры шара лежит в горизонтальной плоскости). Когда поперечный размер спекла становится соизмерим с расстоянием, на котором разность фаз интерферирующих объектных полей изменяется на  $2\pi$ , точность раздельной идентификации полос снижается, что оказывает влияние на корректность расшифровки голографической интерферограммы. В тех областях интерференционной картины, где спеклы вытягиваются поперек полос, видность отдельной полосы снижается. При этом высокочастотные полосы на границе интерферограммы перестают различаться (рис. 4).

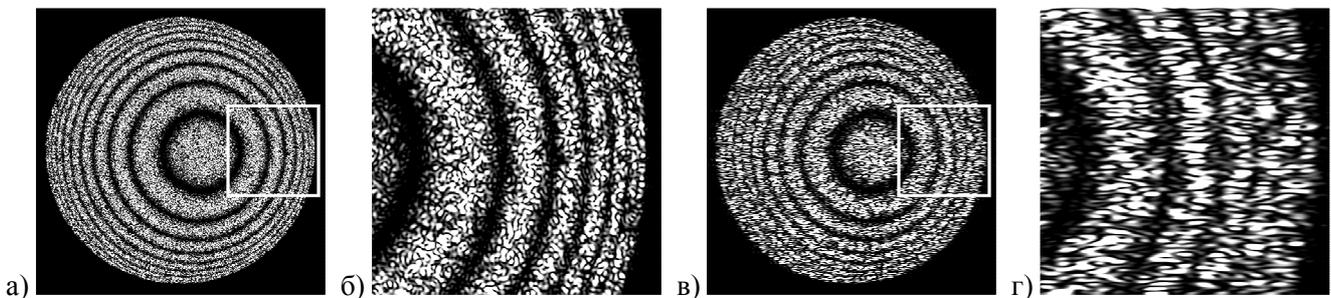


Рис. 4. Влияние формы апертуры объектива на видность интерференционных полос: а) круглая апертура  $D=10$  мм; б) высокочастотные полосы на границе изображения; в) щелевая вертикальная апертура  $l_x \times l_y = 2,5 \times 10$  мм; г) снижение видности интерференционных полос

Использование математического моделирования при контроле деформационных перемещений поверхностей различных объектов методом цифровой лазерной

голографической интерферометрии позволяет предсказывать особенности пространственного распределения полос на экспериментальных интерферограммах, дает возможность оценивать правильность постановки эксперимента и вносить эффективные корректировки в технику его проведения. Возможность внесения в модель различного по характеру и величине деформационного смещения поверхности объекта позволяет получать эталонные интерферограммы такого смещения. Это упрощает расшифровку экспериментальных интерферограмм, отражающих сложные микроперемещения поверхности объектов (сочетающие микросмещения объекта как целого и его деформационные смещения), связанные с одновременным воздействием нескольких источников возмущения, независимых по типу, величине и направлению приложения сил.

Во **второй главе** представлены результаты исследований, связанных с разработкой математического аппарата и реализацией метода численной коррекции фазовых сдвигов в поле микроперемещения поверхности объекта, вызванных его микросмещениями как целого, возникающих и наблюдающихся в цифровой голографической интерферометрии нагруженных диффузно-рассеивающих объектов.

Приведено описание разработанной экспериментальной установки на основе схемы записи голограммы сфокусированного изображения, обсуждаются особенности записи цифровых голограмм, представлен численный алгоритм реконструкции с голограммы численного образа объектного волнового поля путем осуществления процедуры полосовой фильтрации объектных компонент спектра голограммы. Демонстрируются характерные особенности цифровых интерферограмм, полученных путем расчета квадрата модуля суммы восстановленных комплексных амплитуд объектных полей (косинусоидальная интерферограмма) и через прямое вычисление разности фаз объектных полей (фазовая – тангенциальная интерферограмма).

На примере жестко закрепленной по окружности упругой мембраны, испытывающей деформационный прогиб под действием центральной нормально приложенной сосредоточенной силы, показано, что полный фазовый набег  $\Delta\varphi_S(\vec{r}_0)$  между двумя последовательными записями голограмм, соответствующих деформационным микроперемещениям поверхности объекта, определяется суммой вкладов от изгибной деформации поверхности объекта  $\Delta\varphi_{def}(\vec{r}_0)$  и некоторых дополнительных сдвигов  $\Delta\varphi_{mov}(\vec{r}_0)$  от микросмещений объекта как целого:

$$\Delta\varphi_S(\vec{r}_0) = \Delta\varphi_{def}(\vec{r}_0) + \Delta\varphi_{mov}(\vec{r}_0). \quad (2)$$

В общем случае, такие дополнительные фазовые сдвиги, возникающие при сложных деформациях объектов, приводят к появлению сторонних интерференционных полос на интерферограммах. Это ограничивает возможности количественного анализа интерферограмм деформации объекта под действием приложенной нагрузки.

Представлен алгоритм численной коррекции дополнительных фазовых сдвигов, который заключается в перемножении, на этапе формирования интерферограммы, комплексной амплитуды объектного поля, соответствующего нагруженному состоянию объекта, и экспоненциального множителя  $\exp(i\Delta\varphi_D(\vec{r}_0))$ , содержащего в себе выражение для корректирующей пространственной функции разности фаз  $\Delta\varphi_D(\vec{r}_0)$ . При этом остается без изменения выполнение всех основных процедур, применяемых при восстановлении объектных полей с записанных цифровых голограмм сфокусированного изображения и формировании интерферограмм. Аналитическое выражение для корректирующего фазового вклада  $\Delta\varphi_D(\vec{r}_0) = -\Delta\varphi_{mov}(\vec{r}_0)$  определяется геометрическими особенностями объекта исследования и параметрами схемы записи голограммы, а также характером перемещения объекта как целого под действием внешних сил, приложенных к объекту между последовательными экспозициями при записи цифровых голограмм.

Для получения дополнительной качественной и количественной информации об особенностях влияния «сторонних» фазовых вкладов от микросмещений объекта как целого на голографическую интерферограмму исследуемого деформационного микроперемещения точек поверхности объекта разработана математическая модель формирования численных спекл-модулированных интерферограмм упругой деформации тонкой мембраны под действием внешней сосредоточенной силы (рис. 5), совмещенной с её микронаклонами и микросмещениями.

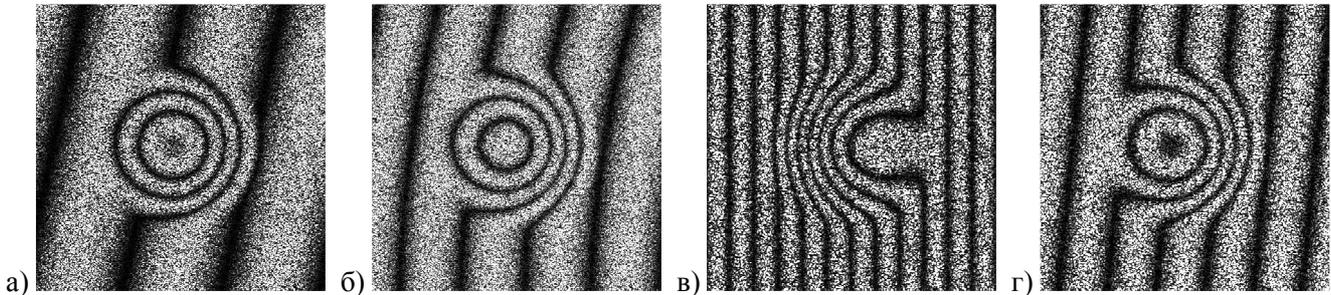


Рис. 5. Полученные в результате численного расчета спекл-модулированные интерферограммы упругого прогиба мембраны под действием нормально приложенной центральной силы. Объект испытывает: а) поперечное микросмещение на  $\delta x_g = -25$  мкм и  $\delta y_g = -5$  мкм; б) продольное микросмещение на  $\delta z_g = -220$  мкм; в) микронаклон относительно вертикальной оси на  $\delta = -20''$ ; г) микронаклон относительно вертикальной оси на  $\delta = 10''$  и горизонтальной оси на  $\omega = 1''$

Использование при моделировании геометрии реальной экспериментальной схемы, практическая возможность внесения в модель произвольных типов деформации и смещений поверхности объекта, а также учет влияния спекл-модуляции поля изображения объекта, позволяют достигнуть высокой степени достоверности численных интерферограмм и качественного их соответствия интерференционным изображениям, получаемым в реальных экспериментах. Такая математическая модель, при условии корректного учета условий натурального эксперимента, позволяет успешно оценивать эффективность численных алгоритмов постобработки цифровых голограмм, применяемых для устранения дополнительных фазовых сдвигов от микронаклонов и поступательных микросмещений объекта.

Применение метода численной коррекции фазовых сдвигов продемонстрировано на экспериментальных интерферограммах прогиба закрепленной по окружности тонкой мембраны, совмещенного с её микросмещениями и микронаклонами как целого.

Поступательные микросмещения объекта как целого приводят к образованию на интерферограмме системы полос конечной ширины, которые накладываются на полосы, отражающие исследуемое деформационное перемещение точек поверхности объекта (рис. 6). В случае продольного микросмещения объекта дополнительные полосы искривлены, что связано с отличиями кривизны волнового фронта освещающего пучка в точках пространства, соответствующих исходному положению объекта и его положению после перемещения. При поперечном микросмещении полосы имеют некоторый наклон в плоскости интерферограммы, задаваемый соотношением величин микросмещений объекта  $\delta x_g / \delta y_g$  относительно перпендикулярных поперечных направлений. Показано, что пространственная частота интерференционных полос от поступательного микросмещения объекта в значительной степени определяется геометрией оптической схемы записи голограммы (направлениями освещения  $\vec{N}_s$  и наблюдения  $\vec{N}_0$ ). При этом оптическая схема наиболее чувствительна к микросмещениям в плоскостях, перпендикулярных вектору чувствительности  $\vec{K}$ , – в таком случае на интерферограмме наблюдаются полосы сравнительно высокой пространственной частоты.

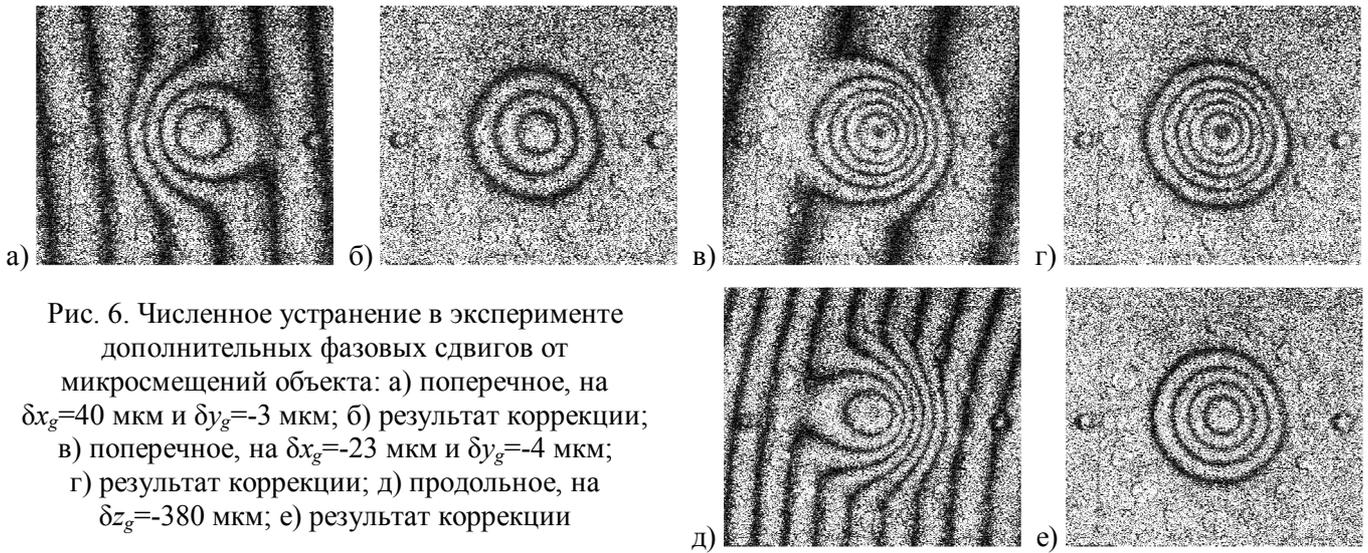


Рис. 6. Численное устранение в эксперименте дополнительных фазовых сдвигов от микросмещений объекта: а) поперечное, на  $\delta x_g=40$  мкм и  $\delta y_g=-3$  мкм; б) результат коррекции; в) поперечное, на  $\delta x_g=-23$  мкм и  $\delta y_g=-4$  мкм; г) результат коррекции; д) продольное, на  $\delta z_g=-380$  мкм; е) результат коррекции

При контроле деформаций поверхности деталей и/или узлов широко распространена ситуация, когда нагрузка объекта приводит к его наклонам и разворотам как целого. Это приводит к формированию системы полос конечной ширины, накладывающихся (аналогично поступательным микросмещениям) на интерференционную картину деформационного перемещения точек поверхности объекта (рис. 7). Это делает затруднительным интерференционный анализ характера деформационного смещения поверхности исследуемого объекта.

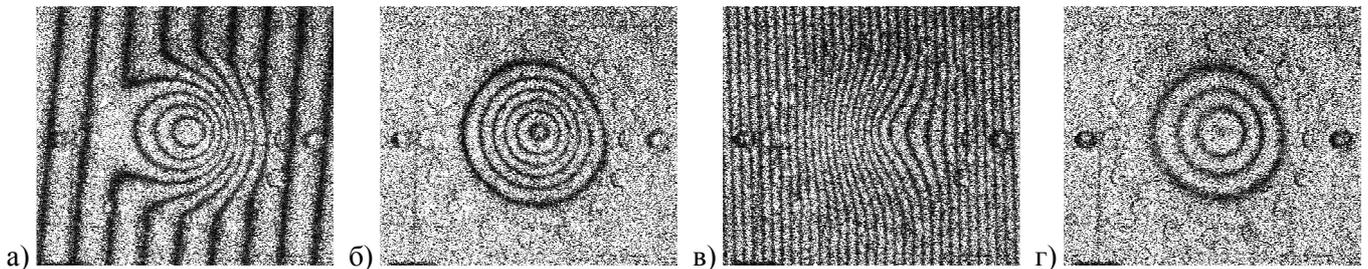


Рис. 7. Численное устранение фазовых сдвигов от наклона упругой мембраны между экспозициями вокруг горизонтальной и вертикальной осей: а) наклон на углы  $\delta=13''$  и  $\omega=1,5''$ ; б) результат коррекции; в) наклон на углы  $\delta=-45''$  и  $\omega=1''$ ; г) результат коррекции

На рис. 8 приведены цифровые голографические интерферограммы, отражающие деформационные микросмещения поверхности электронной платы при изменении её температуры на определенную величину. В процессе тепловой деформации платы возникают её небольшие повороты как целого, приводящие к смещению центра концентричности интерференционных полос (рис. 8а), что затрудняет количественную обработку интерферограмм и расчет профилей прогиба платы для различных диапазонов изменения её температуры. Апостериорная численная обработка цифровых голограмм, в соответствии с разработанным методом коррекции, обеспечивает эффективное устранение влияния наклона и поступательного смещения платы как целого на вид и структуру полос на интерферограмме (рис. 8б) и позволяет рассчитать профили деформационного прогиба платы для различных диапазонов изменения температуры (рис. 9).

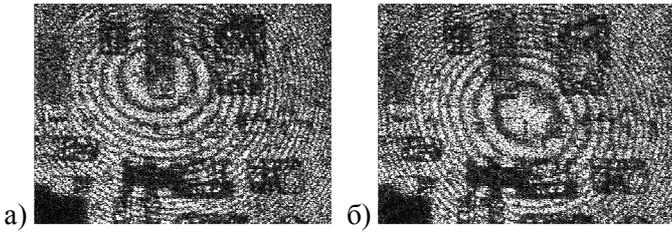


Рис. 8. Применение численной коррекции при формировании интерферограмм деформационного прогиба электронной платы: а) интерферограмма при изменении температуры платы в диапазоне 80-70 °С; б) результат коррекции

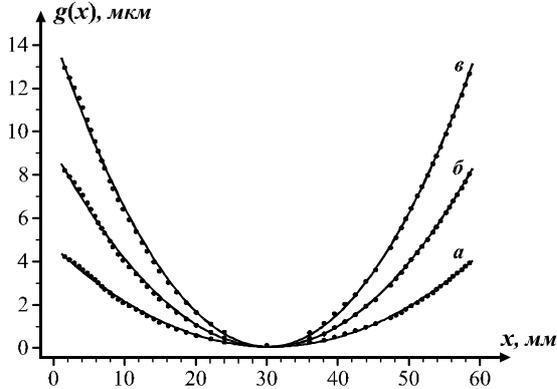


Рис. 9. Рассчитанные профили деформационного прогиба электронной платы для различных диапазонов изменения её температуры: а) 80-70 °С; б) 80-60 °С; в) 80-50 °С

Решение обратной задачи интерферометрии дает возможность определять абсолютную величину деформационного смещения поверхности объекта, но при этом знак направления такого смещения остается неопределенным. В работе предложен метод определения направления деформационного смещения поверхности объекта в реальном эксперименте, основанный на численном внесении (на этапе формирования интерферограммы) в комплексную амплитуду объектного поля одного из состояний объекта предварительно рассчитанного дополнительного фазового сдвига  $\Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0)$ , соответствующего наклону объекта на заданный угол  $\delta$ . В таком случае на интерферограмме возникает система полос конечной ширины от виртуального микронаклона объекта и направление искривления этих полос определяется знаком исходной деформации. Для модельного объекта-мембраны (радиусом  $R$ , освещаемого под углом  $\gamma_0$ ,  $g_{n0}$  – прогиб в точке приложения внешней нагрузки) получено аналитическое выражение для оценки величины смещения центра concentричности замкнутых интерференционных полос от его исходного положения при наклоне объекта как целого на угол  $\delta$  относительно вертикальной оси:

$$\Delta x_C = -\frac{2R}{\sqrt{3}} \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos \left[ \frac{3\sqrt{3}R}{8g_{n0}} \left( \frac{\sin \delta + \sin \gamma_0 + \sin(\delta - \gamma_0)}{1 + \cos \gamma_0} \right) \right] - \frac{2\pi}{3} \right]. \quad (3)$$

Высокие частотные параметры современных цифровых матричных фотоприемников обеспечивают возможность контроля динамически изменяющихся деформационных процессов, характеризующихся высокими градиентами изменения величин микроперемещения поверхности объектов. В работе проведена оценка измерительных возможностей метода цифровой голографической интерферометрии при контроле динамического поля микроперемещений поверхности объекта и сделаны оценки скорости нормального перемещения  $\partial g_z / \partial t$  поверхности объекта, максимального градиента перемещения  $|\partial g_z / \partial x_0|_{\max}$  и максимальной скорости изменения деформации  $|\partial^2 g_z / \partial x_0 \partial t|_{\max}$ :

$$\frac{\partial g_z(\vec{\rho}_0, t)}{\partial t} \leq \frac{0,1 \lambda}{(1 + \cos \gamma_0) \tau_{\text{exp}}}, \quad \left| \frac{\partial g_z(x_0)}{\partial x_0} \right|_{\max} \leq \frac{\lambda f_d M}{2(1 + \cos \gamma_0)}, \quad \left| \frac{\partial^2 g_z(x_0)}{\partial x_0 \partial t} \right|_{\max} \leq \frac{\lambda f_d f_{\max} M}{2(1 + \cos \gamma_0)}, \quad (4)$$

где  $\gamma_0$  – угол между направлениями освещения и наблюдения объекта,  $\tau_{\text{exp}}$  – время экспозиции,  $f_d$  – пространственная частота пикселей на матрице,  $f_{\max}$  – максимальная частота записи изображений,  $M$  – коэффициент увеличения изображения объекта.

Полученные соотношения позволяют определить максимально допустимые величины параметров динамического поля микроперемещений поверхности объекта, которое можно корректно зафиксировать при записи цифровых голограмм с использованием фотоприемника с заданными характеристиками.

В общем случае, при приложении к объекту исследования внешних нагрузок различной природы велика вероятность возникновения его микронаклонов и поступательных микросмещений между экспозициями, которые будут вносить свои вклады в полную разность фаз объектных полей и приводить к искажениям структуры полос на интерферограммах того типа деформации, который выступает предметом исследования. Это затрудняет качественную и количественную интерпретацию интерферограммы. Применение алгоритмов численной коррекционной постобработки голограмм, с целью устранения в объектном поле фазовых сдвигов от вносимых в эксперименте недеформационных микросмещений, служит действенным способом преодоления подобных трудностей и дает возможность повышения точности анализа деформационных процессов при их контроле методами цифровой голографической интерферометрии.

В третьей главе представлены результаты исследований, связанных с разработкой и экспериментальной апробацией методов повышения контраста интерференционных изображений в цифровой голографической интерферометрии посредством использования численных преобразований, вносимых на разных этапах обработки цифровых голограмм.

Обсуждаются особенности формирования спектра дискретно-периодического изображения. На основе дифракционного представления о процессе формирования спектра голограммы, записанной с наклонным опорным пучком, сформулировано основное условие записи цифровой голограммы, спектр которой содержит полный набор пространственных частот объектного поля. На примере интерферограмм упругого прогиба закрепленной по контуру мембраны, сформированных с использованием цифровых голограмм сфокусированного изображения, показано, что взаимное наложение дифракционных порядков в пространственном спектре голограммы, связанное с превышением пространственной частотой записанной голограммной структуры частоты Найквиста используемого в эксперименте матричного фотодетектора, приводит к снижению контраста полос (рис. 10а,б) на интерферограммах.

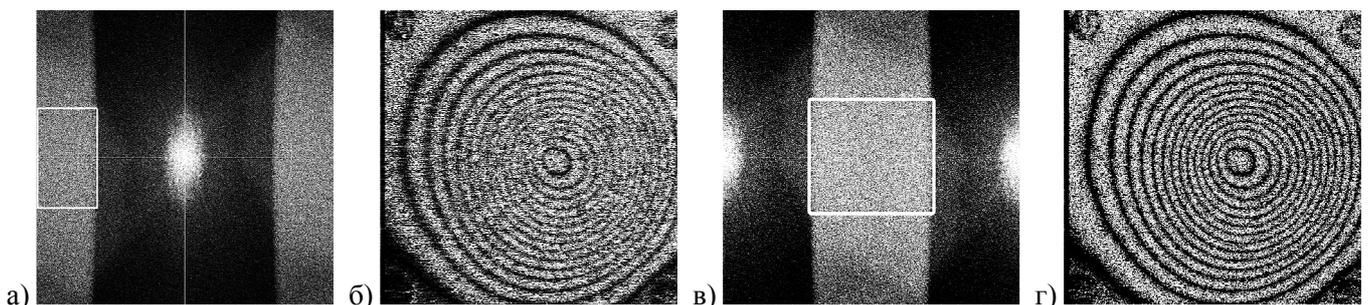


Рис. 10. Применение к интерферограммам упругого прогиба мембраны линейной фазовой модуляции: а) спектр голограммы, записанной с прямоугольным выходным зрачком объектива; б) рассчитанная интерферограмма; в) смещенный пространственный спектр голограммы и окно фильтрации; г) интерферограмма с полосами повышенного контраста

Показано, что применение линейной фазовой модуляции цифровой голограммы (что аналогично использованию наклонно-падающей восстанавливающей волны в классической голографии) на этапе восстановления пространственного спектра объектного поля, позволяет осуществить смещение объектного компонента пространственного спектра цифровой голограммы в область низких частот (рис. 10в), что дает возможность использования более широкого окна фильтрации объектных спектральных компонент. Это

приводит к уменьшению размеров спеклов в восстановленном изображении и соответствующему повышению контраста интерференционных полос формируемых интерферограмм (рис. 10з). Недостатком метода является его вычислительная неэффективность, связанная с необходимостью численного расчета для каждой точки цифровой голограммы комплексной модулирующей функции.

Предложен метод коррекции спектра голограммы путем применения к ней интерполяционной постобработки. Ступенчатая интерполяция исходной цифровой голограммы эквивалента искусственному увеличению частоты выборки голограммы, что приводит к «расширению» её пространственно-частотного спектра в области высоких частот (рис. 11). Это дает возможность на этапе пространственной фильтрации спектра голограммы, записанной при высокой пространственной частоте голограммной структуры, выделить полный диапазон спектральных компонент записанного объектного поля, что приводит к существенному повышению контраста восстанавливаемого с голограммы интерференционного изображения (рис. 12). Применение интерполяционной постобработки дает значительную экономию вычислительных ресурсов, в сравнении с линейной модуляцией голограммы, в силу того, что интерполяционные процедуры осуществляются над массивами действительных чисел – изображениями-голограммами.

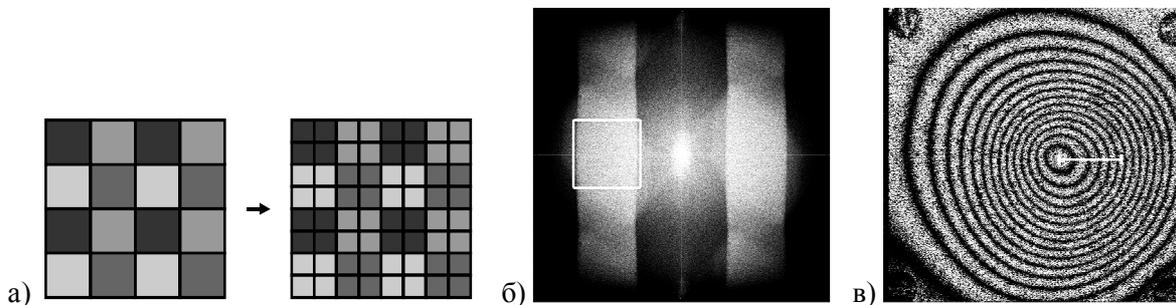


Рис. 11. Применение к голограмме интерполяционной постобработки: а) пример интерполяции методом «ближайшего соседа» (ступенчатая интерполяция); б) «расширенный» пространственный спектр голограммы и окно пространственной фильтрации; в) интерферограмма упругого прогиба мембраны, полученная в результате интерполяционной постобработки

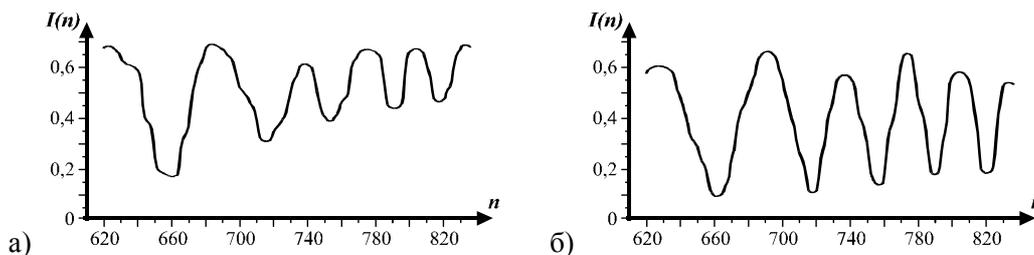


Рис. 12. Пространственные вариации средней интенсивности интерференционной картины: а) для интерферограммы на рис. 10б; б) для интерферограммы на рис. 11в

Рассматривается возможность повышения точности определения пространственного положения интерференционных полос путем использования операции окружения объектных частотных компонент спектра голограммы постоянными (нулевыми) значениями, что эквивалентно расширению окна фильтрации спектра до размеров голограммы (до нескольких размеров) с сохранением в пределах этого окна только пространственных частотных компонент комплексной амплитуды объектного поля. Наблюдаемое при этом повышение качества восстановленного изображения обусловлено увеличением частоты выборки выходных данных в алгоритме быстрого фурье-преобразования, что с физической точки зрения означает увеличение разрешения распределения интенсивности поля в пределах одиночных спеклов в изображении за счет увеличения количества пикселей изображения, приходящихся на один спекл (рис. 13 и 14).

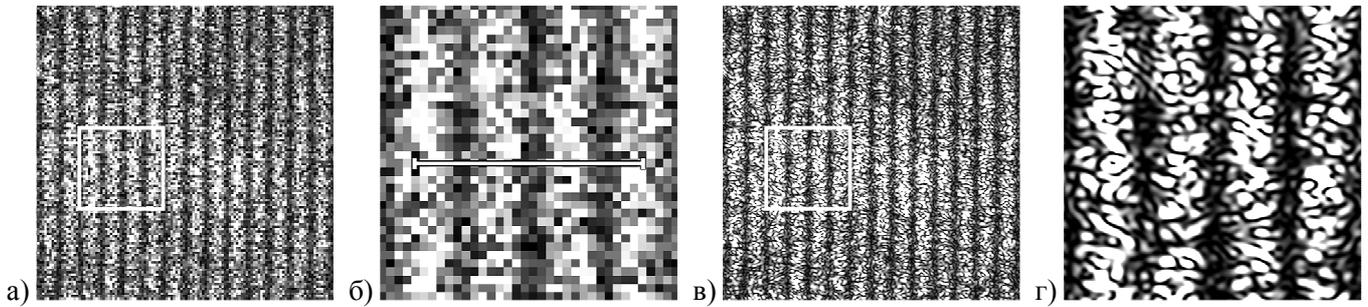


Рис. 13. Голографическая интерферограмма микронаклона объекта, полученная фильтрацией спектра: а) ограниченным окном, совпадающим по ширине со спектром оптического поля изображения объекта; б) увеличенный фрагмент интерферограммы; в) при окружении окна фильтрации нулевыми значениями; г) увеличенный фрагмент интерферограммы

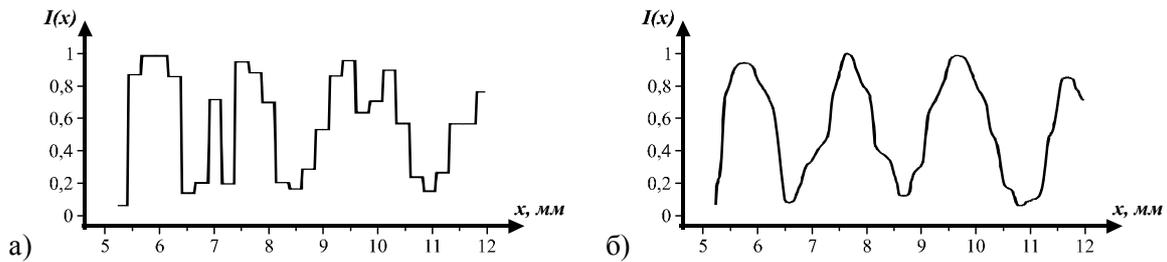


Рис. 14. Пространственные вариации интенсивности на интерферограммах рис. 13б,г: а) фильтрация ограниченным окном; б) при окружении окна фильтрации нулевыми значениями

Показано, что контраст полос на голографической интерферограмме может быть повышен путем формирования в восстановленном изображении объекта спеклов такого размера и формы, которые в наибольшей степени удовлетворяют пространственным параметрам картин интерференционных полос, формирующихся при исследуемом деформационном микроперемещении точек поверхности объекта (рис. 15 и 16). Такое управление геометрией спеклов может быть осуществлено путем подбора размеров и формы окна пространственно-частотной фильтрации объектных частотных компонент спектра при формировании голографических интерферограмм.

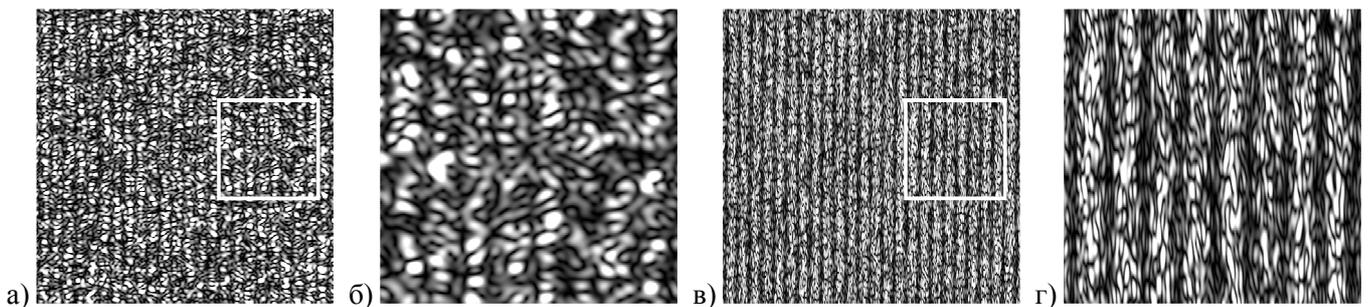


Рис. 15. Голографическая интерферограмма микронаклона ( $\delta=60^\circ$ ) металлической пластины, полученная при фильтрации спектра: а) квадратным окном; б) увеличенный фрагмент интерферограммы; в) окном, вытянутым горизонтально; г) увеличенный фрагмент интерферограммы

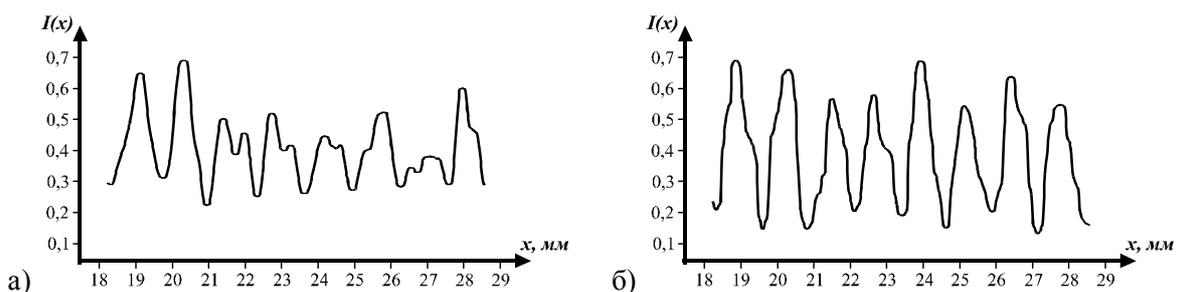


Рис. 16. Пространственные вариации интенсивности на интерферограммах рис. 15б,г: а) фильтрация спектра квадратным окном; б) фильтрация спектра окном, вытянутым поперек полос

Таким образом, применение специализированных численных процедур апостериорной обработки цифровых голограмм (как на этапе расчета и формирования пространственного спектра голограмм, так и при проведении пространственно-частотной фильтрации спектральных компонент объектного поля) дает возможность эффективного повышения степени корреляции комплексных амплитуд восстанавливаемых объектных полей, выражающейся в повышении контраста полос на формируемых интерферограммах, и пространственного разрешения цифровой голографической интерферометрии диффузно-отражающих и прозрачных объектов.

В четвертой главе представлены результаты исследований, связанных с разработкой и реализацией численных алгоритмов голографической постобработки интерферограмм, получаемых в частично-когерентном свете, и голографического пространственно-высокоразрешающего контроля быстропротекающих процессов в микрообъемах прозрачных сред.

Теоретически и экспериментально обосновано, что двухволновой интерферометр можно рассматривать в качестве системы записи голограммы. Соответственно, пространственное распределение интенсивности в интерференционной картине, формирующейся в таком интерферометре, можно рассматривать в качестве голограммной структуры. Если используется частотно широкополосный и протяженный источник света, то цифровая голограмма имеет пространственно локализованный характер – голографическая запись осуществляется в локальном месте, где формируется интерференционная картина. Область локализации и её протяженность определяются степенью взаимной когерентности интерферирующих полей.

В работе представлен численный алгоритм голографического формирования изображений с интерферограмм, записанных в частично-когерентном свете в микроинтерферометре Линника. Описаны процедуры записи цифровых голограмм и их обработки, обеспечивающие эффективное подавление компонент дифракционного гало в спектре голограмм и заключающиеся в вычитании изображений объектного и опорного оптических полей из изображения картины их интерференции.

Представленный метод голографической обработки в работе применялся с целью выявления особенностей морфологии клеток крови. Использовались три источника освещения: галогеновая лампа белого света ( $\lambda_H = 0,535$  мкм, длина временной когерентности, за счет сравнительно узкой полосы чувствительности фотодетектора,  $l_{CH} \approx 1,5$  мкм); полупроводниковый светодиод ( $\lambda_D = 0,65$  мкм,  $l_{CD} \approx 10$  мкм); гелий-неоновый лазер ( $\lambda_L = 0,63$  мкм,  $l_{CL} \approx 0,3$  м). Опорные полосы на интерферограммах формировались путем наклона зеркала в опорном плече микроинтерферометра на угол  $\alpha \approx 6^\circ$  (рис. 17).

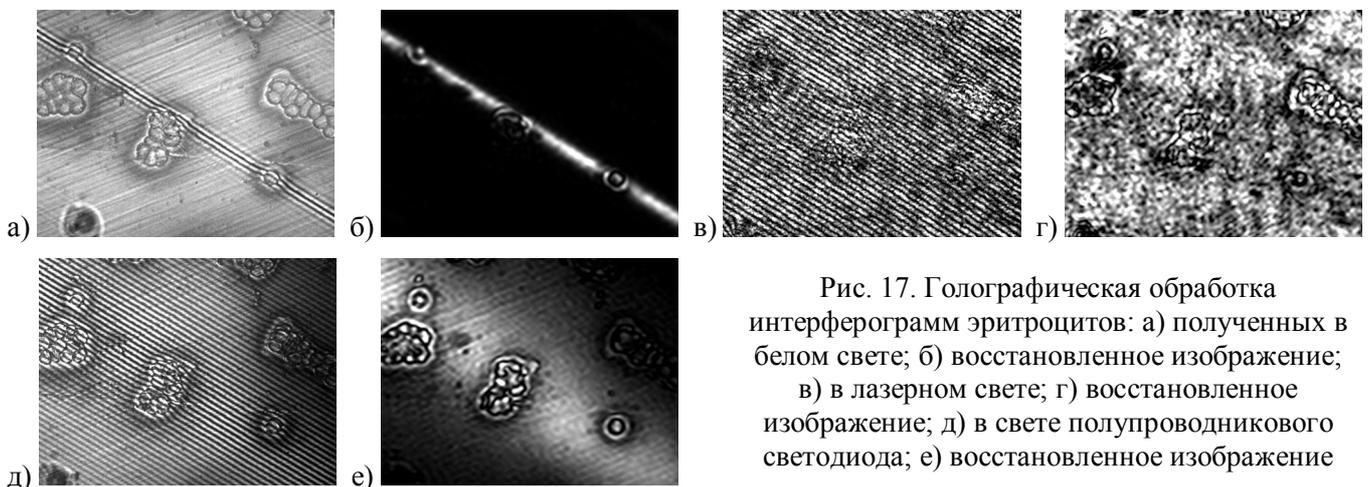


Рис. 17. Голографическая обработка интерферограмм эритроцитов: а) полученных в белом свете; б) восстановленное изображение; в) в лазерном свете; г) восстановленное изображение; д) в свете полупроводникового светодиода; е) восстановленное изображение

Малая длина временной когерентности белого света обуславливает небольшое число несущих полос на изображении объекта (рис. 17а) и ограничивает протяженность области локализации полос в перпендикулярном полосам направлении. Это приводит к восстановлению с голограммы комплексной амплитуды объектного поля в такой же по размеру области. Применение лазерного источника с большой длиной когерентности позволяет сформировать интерферограмму, на которой система опорных полос полностью покрывает поле зрения (рис. 17в) и восстановление изображения осуществляется по всей площади записанной интерферограммы. Однако в интерференционной картине формируются когерентные шумы, включая спекл-модуляцию, которая переносится на восстановленное изображение, что значительно снижает разрешение изображения. Данная проблема находит решение в применении светодиода с достаточно эффективной длиной временной когерентности (рис. 17д). По сравнению с источником белого света значительно увеличивается протяженность области локализации интерференционных полос, определяемой длиной когерентности (рис. 18), – голограммная структура формируется на значительной части поля зрения. При этом в изображении не возникает паразитной пространственной модуляции объектной и опорной волн – спекл-модуляции.

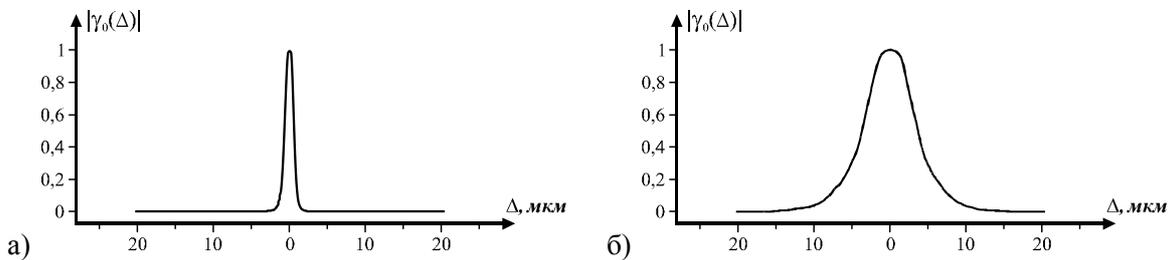


Рис. 18. Степень взаимной когерентности  $|\gamma_0(\Delta)|$  опорного и объектного полей в шкале их разности хода, определенная по восстановленным изображениям: а) в белом свете (рис. 17б); б) в свете полупроводникового светодиода (рис. 17е)

На рис. 19 представлен результат численной визуализации микрорельефа поверхности  $h(x, y)$  нескольких эритроцитов, осуществленной по восстановленному с интерферограммы пространственному распределению комплексной амплитуды объектного поля (рис. 17е). Хорошо различимы размер и форма эритроцитов на стеклянной подложке.

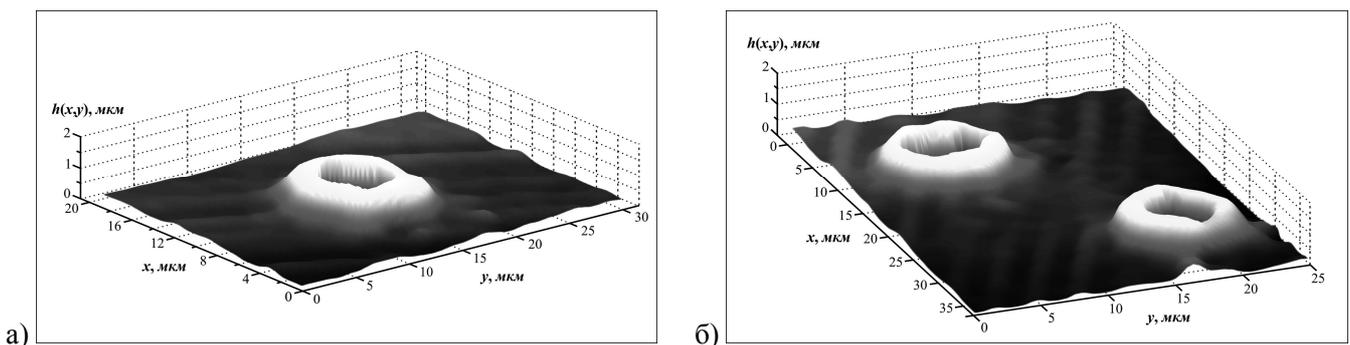


Рис. 19. Восстановление микрорельефа поверхности эритроцитов с интерферограммы, записанной в излучении светодиода: а) профиль микрорельефа поверхности одиночного эритроцита; б) профиль микрорельефа поверхности пары эритроцитов

Таким образом, применение метода голографической обработки интерференционных изображений в частично-когерентном свете позволяет представить пространственное распределение фазы объектного поля в численном виде, что исключает трудоемкий процесс интерпретации интерферограмм в полосах конечной ширины и позволяет осуществить трехмерную визуализацию микрорельефа поверхности исследуемого объекта. При этом имеется возможность при записи интерферограммы эффективно применять стандартные системы формирования интерференционных изображений, например,

микроинтерферометр Линника, широко используемый на практике в технологических разработках.

Для решения задач по контролю процессов массопереноса в прозрачных средах разработан метод цифровой голографической интерферометрии на основе записи безлинзовой фурье-голограммы. Практическим преимуществом метода является возможность регистрации диффузионного процесса на протяжении всего времени его протекания, что позволяет осуществлять многоэкспозиционный интерференционный анализ динамики исследуемого процесса. В работе описана методика проведения эксперимента и алгоритм обработки цифровых голограмм. Апробация метода осуществлялась при исследованиях пространственного распределения компонентов взаимодиффузии веществ в бинарной системе «этиловый спирт – вода» (рис. 20).

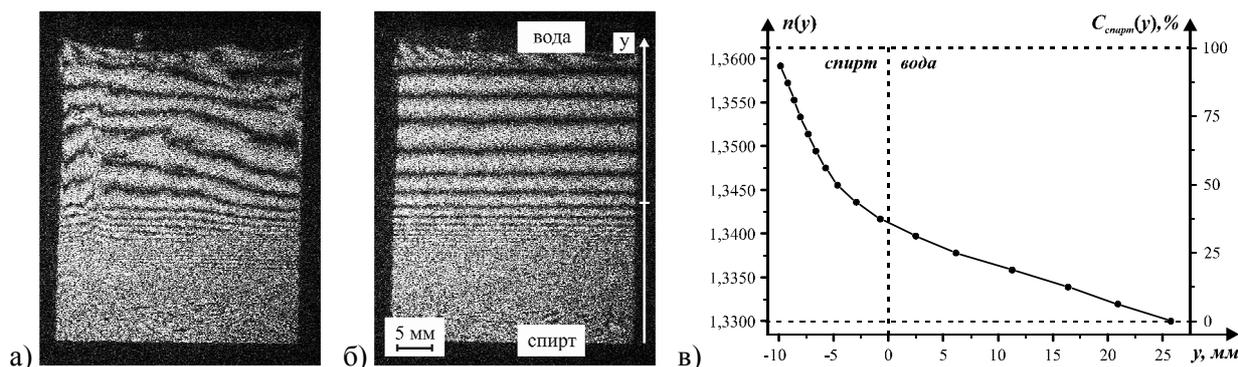


Рис. 20. Исследование процесса массопереноса в системе «этиловый спирт – вода» методом цифровой безлинзовой фурье-голографии: а) фрагмент интерферограммы, время диффузии 1 мин; б) фрагмент интерферограммы, 9 мин; в) распределение показателя преломления  $n(y)$  и концентрации этилового спирта  $C_{спирт}(y)$  в процессе массопереноса (длительность процесса 9 мин)

Однако относительно невысокое поперечное пространственное разрешение метода, обусловленное малыми размерами матричного фотодетектора, в сочетании с геометрическими особенностями схемных решений записи безлинзовой голограммы Фурье (изображение исследуемого объекта занимает лишь небольшую часть восстановленного с голограммы спектра), приводят к трудностям с отдельной идентификацией высокочастотных интерференционных полос, возникающих при исследовании быстропротекающих процессов массопереноса с большими значениями градиента концентрации компонентов в исследуемых системах.

В работе рассмотрено применение метода цифровой лазерной голографической интерференционной микроскопии (основанного на записи безлинзовой фурье-голограммы сфокусированного изображения) для увеличения поперечного пространственного разрешения при контроле динамики диффузионных процессов, протекающих в микрообъемах прозрачных сред. Обсуждаются особенности схемных решений экспериментальной системы; подробно описан численный алгоритм обработки голограмм сфокусированного изображения. Показано, что применение при записи цифровой голограммы высококачественных объективов с достаточно большим увеличением и высокой числовой апертурой, в сочетании со специализированными численными алгоритмами постобработки (рис. 21), обеспечивает возможность высокоразрешающего пространственного контроля процессов массопереноса на границе раздела жидкостей – в области максимально высокого градиента показателя преломления (рис. 22 и 23). При этом интерферограммы процесса взаимодиффузии, формируемые с записанных голограмм, занимают всю площадь цифровой голограммы. С другой стороны, использование микрообъективов с большим увеличением приводит к уменьшению поля зрения при записи голограммы сфокусированного изображения, что вносит ограничение на

длительность контролируемого процесса – в полной мере контроль процесса возможен до момента расширения области диффузии за границы поля зрения.

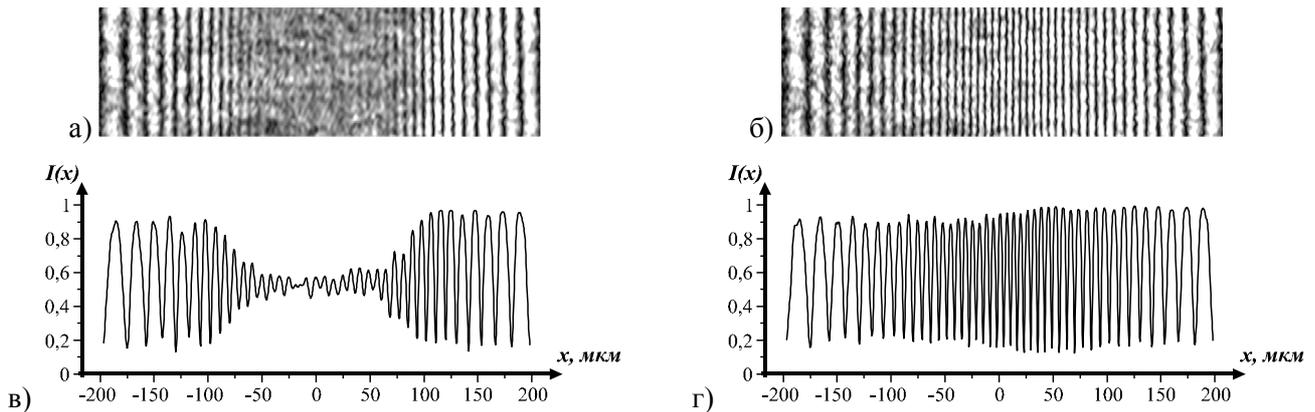


Рис. 21. Повышение контраста полос на интерферограммах путем окружения объектного спектра «нулевым полем»: а) фрагмент исходной интерферограммы; б) интерферограмма после обработки; в) пространственные вариации интенсивности на исходной интерферограмме; г) повышение контраста полос при окружении окна фильтрации нулевыми значениями

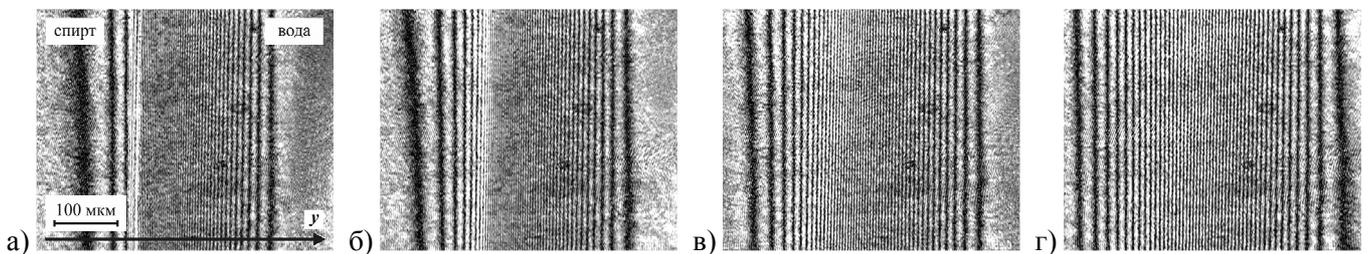
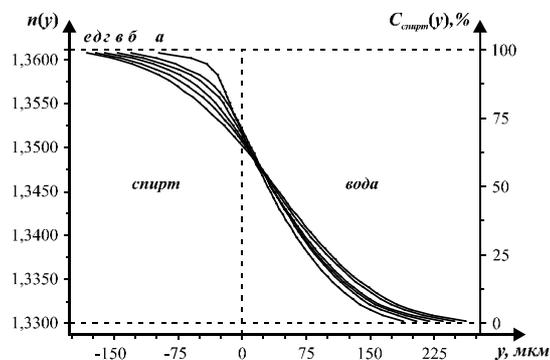


Рис. 22. Голографические микроинтерферограммы процесса массопереноса в системе «этиловый спирт – вода» в различные моменты времени после сливания жидкостей: а) 42 с; б) 78 с; в) 134 с; г) 188 с

Рис. 23. Распределение показателя преломления  $n(y)$  и концентрации этилового спирта  $C_{спирт}(y)$  в растворе в ходе процесса массопереноса. Длительность процесса: а) 42 с; б) 78 с; в) 114 с; г) 134 с; д) 152 с; е) 188 с



Необходимо отметить, что диффузионные процессы являются быстропротекающими процессами с достаточно высокими градиентами пространственного распределения показателя преломления  $n(x, y)$ . За время между двумя последовательными экспозициями показатель преломления в заданной точке бинарной системы не должен существенно изменяться, тогда система интерференционных полос на голографической интерферограмме будет разрешаться. В работе получены аналитические выражения для оценки максимально возможного градиента изменения показателя преломления  $|\partial \Delta n(x, y) / \partial y|_{\max}$ , при котором разрешаемы соседние полосы на интерферограмме, а также для максимально возможной величины изменения во времени градиента изменения показателя преломления  $|\partial^2 \Delta n(x, y) / \partial y \partial t|_{\max}$ :

$$\left| \frac{\partial \Delta n(x, y)}{\partial y} \right|_{\max} \leq \frac{1}{2l} \lambda f_d M, \quad \left| \frac{\partial^2 \Delta n(x, y)}{\partial y \partial t} \right|_{\max} \leq \frac{\lambda M}{2l} f_d f_{\max}, \quad (5)$$

где  $l$  – толщина слоя исследуемой жидкости (толщина кюветы),  $f_d$  – пространственная частота расположения пикселей фотодетектора,  $f_{\max}$  – максимальная частота записи изображений,  $M$  – коэффициент увеличения оптической системы.

Применение метода цифровой лазерной голографической интерференционной микроскопии при анализе динамики процесса взаимодиффузии веществ в бинарных системах позволяет с высокой точностью определять параметры массопереноса, рассчитывать диффузионные характеристики таких систем (при корректном выборе соответствующей теоретической модели), прогнозировать поведение системы при изменяющихся внешних условиях. Результаты интерференционных измерений могут применяться при решении ряда практических задач, таких как прогнозирование диффузионной подвижности компонентов системы, оценка фазовых и термодинамических характеристик бинарных систем и материалов, построенных на их основе.

**В ЗАКЛЮЧЕНИИ** приведены основные результаты диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

В проведенных исследованиях получены следующие основные результаты:

**1.** Разработана теоретическая модель и реализован численный алгоритм расчета и визуализации картины пространственного распределения интенсивности света на голографической интерферограмме диффузно-рассеивающего объекта с учетом спекл-модуляции в поле изображения объекта при вариациях формы и размеров апертуры изображающей оптической системы, геометрических параметров оптической схемы записи голограммы и при различных пространственных распределениях фазы в освещающем объект лазерном пучке.

**2.** Показано при численном моделировании распределения интенсивности света на голографической интерферограмме и в натурном эксперименте, что учет кривизны волнового фронта освещающей объект волны позволяет отразить в картине интерференционных полос цифровой голографической интерферограммы фазовый вклад от поступательных микросмещений объектов в плоскостях, поперечных вектору чувствительности  $\vec{K}$  оптической системы записи голограммы – вектору разности направлений наблюдения  $\vec{N}_0$  и освещения  $\vec{N}_s$ ,  $\vec{K} = \vec{N}_0 - \vec{N}_s$ .

**3.** Разработана математическая модель формирования численных голографических спекл-модулированных интерферограмм изгибных деформаций объектов с рассеивающей поверхностью с возможностью внесения в модель произвольных параметров деформации и смещений объекта как целого, а также учета геометрии реальной экспериментальной схемы, что позволяет достигнуть высокой степени достоверности численных интерферограмм и качественного их соответствия реальным интерференционным изображениям.

**4.** Теоретически обоснован и реализован численный алгоритм коррекционной постобработки интерферограмм с целью устранения возникающих в эксперименте дополнительных микронаклонов и поступательных микросмещений объекта как целого. Показано, что численное добавление корректирующей разности фаз в комплексную амплитуду объектного поля деформированного состояния объекта на этапе формирования голографической интерферограммы позволяет эффективно устранить фазовый вклад от микронаклонов и микросмещений как целого и реконструировать интерферограмму, отражающую только тот фазовый сдвиг в объектном поле, который вызван деформационными микросмещениями поверхности объекта. Получены аналитические выражения для корректирующего фазового вклада, определяемые геометрическими

параметрами объекта и схемы записи голограммы, а также характером перемещения объекта как целого под действием приложенных к объекту внешних сил.

**5.** Показано, что при записи серии цифровых голограмм сфокусированного изображения, отражающих поступательное микросмещение объекта, оптическая схема записи наиболее чувствительна к таким микросмещениям, которые осуществляются в плоскостях, перпендикулярных направлению вектора чувствительности  $\vec{K}$ . При этом пространственная частота формирующейся системы интерференционных полос в значительной степени определяется геометрией оптической схемы записи голограммы – направлениями освещения  $\vec{N}_S$  и наблюдения  $\vec{N}_0$  точек поверхности объекта.

**6.** Показано, что применение при записи цифровых голограмм современных цифровых матричных фотоприемников, характеризующихся высокими частотными параметрами, обеспечивает возможность контроля динамически изменяющихся деформационных процессов в объекте с высоким градиентом изменения величины микросмещения его поверхности. Получены аналитические соотношения для оценки максимально допустимых величин параметров динамического поля микросмещений поверхности объекта при известных характеристиках цифровой матрицы фотодетектора.

**7.** Разработан численный алгоритм повышения контраста полос на цифровой интерферограмме посредством ступенчатой интерполяции исходных цифровых голограмм, что приводит к «расширению» пространственно-частотного спектра голограмм в область высоких частот и эквивалентно искусственному увеличению частоты выборки при записи голограмм. Существенное повышение контраста формируемых интерферограмм достигается за счет возможности выделения полного диапазона спектральных компонент записанного объектного поля на этапе проведения пространственной фильтрации в «расширенном» пространственном спектре голограммы.

**8.** Показано увеличение контраста полос на интерферограммах в голографии сфокусированного изображения за счет формирования в восстановленном изображении спеклов эффективной геометрии путем подбора размеров и формы окна пространственно-частотной фильтрации частотных компонент объектного поля, а также за счет увеличения количества пикселей, приходящихся на один спекл восстановленного изображения – интерферограммы при использовании численной операции окружения объектных частотных компонент спектра голограммы нулевыми (постоянными) значениями и увеличения размеров числовой матрицы пространственного спектра голограммы.

**9.** Разработан метод численной голографической постобработки интерферограмм, формирующихся в двухволновых интерферометрах в частично-когерентном свете протяженного источника с широким частотным спектром. Показано, что такие интерферограммы можно рассматривать как пространственно локализованные цифровые голограммы, при этом протяженность области голографической записи определяется степенью взаимной когерентности интерферирующих полей. Показано, что применение голографического метода обработки цифровых интерферограмм в интерференционной микроскопии в частично-когерентном свете обеспечивает представление информации о пространственном распределении комплексных амплитуд объектного поля по поверхности микрообъекта в численной форме и предопределяет возможность трехмерной визуализации микрорельефа поверхности объекта.

**10.** Разработан метод лазерной многоэкспозиционной голографической интерференционной микроскопии пространственно высокоразрешающего контроля быстропротекающих процессов в микрообъектах прозрачных сред, основанный на цифровой записи голограмм сфокусированного изображения. Показано, что разрешение высокочастотных интерференционных полос, обусловленных высоким градиентом показателя преломления в исследуемом микрообъеме среды, может быть достигнуто за счет применения при записи цифровой голограммы высококачественных объективов с

большим увеличением и большой числовой апертурой. Продемонстрировано повышение разрешения высокочастотных интерференционных полос на интерферограммах процесса взаимодиффузии при использовании процедуры численного окружения объектных частотных компонент спектра голограммы «нулевым полем», а также за счет подбора оптимальной геометрии пятна разрешения в формируемой интерферограмме путем выбора соответствующих формы и размеров окна пространственно-частотной фильтрации. Получены оценки поперечного пространственного разрешения и пространственно-временных возможностей метода цифровой лазерной голографической интерференционной микроскопии при исследовании диффузионных процессов.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Статьи в рецензируемых журналах из списка, рекомендованных ВАК*

1. Диков О.В., Савонин С.А., Качула В.И., Рябухо В.П. Цифровая голографическая интерферометрия микросмещений объектов с рассеивающей поверхностью // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36. – № 1. – С. 51-64.
2. Диков О.В., Савонин С.А., Качула В.И., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Цифровая голографическая интерферометрия микродеформаций рассеивающих объектов // Изв. Саратовского ун-та. Нов. серия. Сер. «Физика». – 2012. – Т. 12. – Вып. 1. – С. 12-17.
3. Савонин С.А., Абрамов А.Ю., Рябухо В.П. Цифровая голографическая микроинтерферометрия процессов взаимодиффузии в прозрачных средах // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 11. – С. 59-66.
4. Савонин С.А., Рябухо П.В., Рябухо В.П. Постобработка голограмм сфокусированного изображения в цифровой голографической интерферометрии // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – № 1. – С. 26-35.

### *Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций*

5. Абрамов А.Ю., Савонин С.А., Шиповская А.Б., Рябухо В.П. Применение цифровой голографической микроскопии для исследования процесса растворения хитозана в воде // Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии: межвузовский сб. науч. трудов VII Всеросс. конф. молодых ученых. – Саратов: КУБиК, 2010. – С. 242-244.
6. Абрамов А.Ю., Савонин С.А., Диков О.В., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Цифровая голографическая интерферометрия сфокусированных изображений фазовых микрообъектов // Сб. тр. международ. конф. «Фундаментальные проблемы оптики – 2010». / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб, 2010. – Т.1. – С. 272-274.
7. Абрамов А.Ю., Савонин С.А., Диков О.В., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Цифровая голографическая фазовая микроскопия // Вопросы прикладной физики. – 2010. – Вып. 17. – С. 54-59.
8. Савонин С.А., Абрамов А.Ю., Рябухо В.П. Цифровой голографический фазовый микроскоп // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2010: Материалы ежегодной Всеросс. науч. школы-семинара / Под ред. проф. Д.А. Усанова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. – С. 157-160.
9. Тараканчикова Я.В., Савонин С.А., Абрамов А.Ю., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Безлинзовая фурье-голограмма сфокусированных изображений // VIII Всеросс. молодежный Самарский конкурс-конференция науч. работ по оптике и лазерной физике: сб. конкурсных докл. (Самара, 17-20 ноября 2010 г.). – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2010. – С. 132-139.
10. Савонин С.А., Абрамов А.Ю., Рябухо В.П. Цифровая голографическая микроскопия в исследовании процессов диффузии в полимерных средах // Научная сессия НИЯУ МИФИ–2011. Научно-техническая конф.-семинар по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 43-44.

11. Савонин С.А., Лычагов В.В., Рябухо В.П. Интерференционная микроскопия в частично когерентном свете с обработкой изображений методом цифровой голографии // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2011: материалы 15-й Международ. молодеж. науч. школы по оптике, лазерной физике и биофотонике / Под ред. В.В. Тучина, Г.В. Симоненко. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2011. – С. 76-79.

12. Савонин С.А., Лычагов В.В., Рябухо В.П. Цифровая низкокогерентная голографическая микроскопия // Всеросс. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – С. 225-226.

13. Савонин С.А., Абрамов А.Ю. Цифровая голографическая интерферометрия в исследовании процессов диффузии в жидкостях // Материалы Всеросс. науч. конф. с Международ. участием «Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении». – Саратов: Издательский Центр «Наука», 2013. – С. 376-379.

14. Савонин С.А., Абрамов А.Ю., Рябухо П.В. Численная коррекция фазовых сдвигов в цифровой голографической интерферометрии // III Всеросс. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – С. 180-181.

15. Рябухо П.В., Савонин С.А., Шапошников О.А., Рябухо В.П. Цифровая голографическая интерферометрия температурных изгибных деформаций электронных плат // IV Международ. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 318-319.

16. Савонин С.А., Рябухо П.В., Рябухо В.П. Интерполяционная постобработка цифровых голограмм сфокусированного изображения // IV Международ. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 378-379.

17. Рябухо П.В., Савонин С.А., Гризбил Б.А., Якунин А.Н., Шапошников О.А., Рябухо В.П. Определение полей температурных деформаций электронных плат методами цифровой голографической интерферометрии // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2015: материалы Международ. симп. и Международ. молодеж. науч. школы Saratov Fall Meeting 2015 / Под ред. Г.В. Симоненко, В.В. Тучина. – Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2015. – С. 27-33.

18. Савонин С.А., Рябухо В.П. Численная коррекция пространственных фазовых сдвигов от микронаклонов и поступательных микросмещений диффузно-рассеивающих объектов в цифровой голографической интерферометрии // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2015: материалы Международ. симп. и Международ. молодеж. науч. школы Saratov Fall Meeting 2015 / Под ред. Г.В. Симоненко, В.В. Тучина. – Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2015. – С. 27-33.

19. Савонин С.А., Рябухо В.П. Применение математического моделирования при численной коррекции микронаклонов объекта в цифровой голографической интерферометрии // V Международ. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. трудов – М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 221-222.