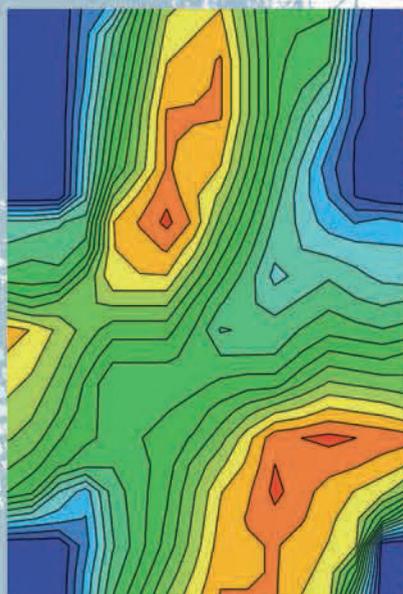




Н. Б. БАЗЫЛЕВ, Н. А. ФОМИН

# КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЙ, ОСНОВАННАЯ НА СПЕКЛ-ТЕХНОЛОГИЯХ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова

Н. Б. БАЗЫЛЕВ, Н. А. ФОМИН

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ  
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЙ,  
ОСНОВАННАЯ  
НА СПЕКЛ-ТЕХНОЛОГИЯХ

Минск  
«Беларуская навука»  
2016

УДК 532.082.5

**Базылев, Н. Б.** Количественная визуализация течений, основанная на спекл-технологиях / Н. Б. Базылев, Н. А. Фомин. – Минск : Беларуская навука, 2016. – 392 с. – ISBN 978-985-08-2065-5.

Обобщены и систематизированы исследования авторов, посвященные разработке и практическому использованию в практике новых методов визуализации течений, основанных на применении спекл-технологий. В книге изложены теоретические и экспериментальные основы таких методов диагностики, как спекл-технологии. Развита дифракционная теория спекл-фотографии, спекл-интерферометрии, методов PIV, BOS, Тальбот-интерферометрии и др. Излагаются основы нового научного направления, объединяющего классическую интерферометрию, спекл-интерферометрию и цифровую обработку изображений. Это направление предполагает использование компьютерной техники не только для расшифровки интерферограмм, но и для внесения обратных связей в оптическую схему.

Книга рассчитана на широкий круг читателей – научных работников и инженеров, занимающихся изучением прозрачных неоднородностей в различных областях науки и техники (в теплофизике, газовой динамике, гидродинамике, оптике, биологии и др.). Монография будет полезна также студентам университетов, бакалаврам, магистрам и аспирантам.

Табл. 9. Ил. 294. Библиогр.: 868 назв.

**Р е ц е н з е н т ы:**

академик НАН Беларуси О. Г. Пенязьков,  
академик Международной инженерной академии Л. В. Танин

**ISBN 978-985-08-2065-5**

© Базылев Н. Б., Фомин Н. А., 2016  
© Оформление. РУП «Издательский дом  
«Беларуская навука», 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Техника спекл-фотографии (СФ) начала развиваться в Институте тепло- и массообмена (ИТМО) им. А. В. Лыкова АН БССР в середине 1980-х годов. Первые эксперименты прошли в университете г. Бохум (земля Северный Рейн-Вестфалия, Германия) под руководством профессора Вольфганга Мерцкирша [1–4], в которых также принимал участие молодой ученый из Германии Ульрих Вернекинг. Эксперименты были продолжены как в Минске, так и в Германии, в университете г. Эссен (земля Северный Рейн-Вестфалия), куда переехал профессор В. Мерцкирш [5]. С самого начала работы со спекл-фотографией стало понятно, что технике СФ присуща очень высокая точность считывания первичных экспериментальных данных. Именно это позволило использовать СФ для определения внутренней структуры в трехмерных течениях методами реконструктивной томографии с использованием интегрального преобразования Радона [6–10]. По тем же причинам техника СФ привлекла к себе внимание специалистов по исследованию турбулентных течений и реконструкции локальных статистических параметров турбулентности по следовым отпечаткам с использованием интегральных преобразований, которые впоследствии стали называть преобразованиями Эрбека–Мерцкирша [11–14]. В этих исследованиях активное участие принимали молодые ученые из Германии – Ульрих Вернекинг, Хармут Винтрих, Клаус Оберстелен и Ральф Эрбек, а также исследователи из ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР – Г. Н. Блинков, Д. Э. Виткин и Е. И. Лавинская. В ходе диссертационных исследований Р. Эрбеку удалось полу-

чить интегральные преобразования, связывающие трехмерные корреляционные функции плотности с двумерными функциями, полученными при измерениях по проекциям. Эти преобразования являются статистическими аналогами известных преобразований Абеля и Радона и широко используются при измерении параметров турбулентности [15–24].

За этот период времени в ИТМО им. А. В. Лыкова АН Беларуси были защищены кандидатские диссертации Г. Н. Блинковым [19], Д. Э. Виткиным [21], Е. И. Лавинской [23] и Н. Б. Базылевым [24]. В оппонировании этих диссертаций приняли участие известные ученые из СССР – профессора И. С. Клименко, С. А. Лосев, крупные белорусские ученые – академик НАН Беларуси А. Г. Шашков, профессора Н. М. Спорник и В. Г. Баштовой, кандидаты наук Н. И. Лемеш и П. П. Храпцов.

С 1970 г. известно, что спекл-поля образуются не только при рассеянии лазерного излучения на шероховатых технических поверхностях, но и при рассеянии на живых тканях и органах. Последние называются биоспекл-поля. Совместные исследования биоспекл-полей проводились во Франции, в лаборатории исследования тепловых процессов (ЛИТП) Высшей национальной школы Франции по механике и аэродинамике (ВНШФМА), г. Пуатье, под руководством профессора Жана-Бернара Солнье. В ходе этих исследований было установлено, что интенсивность падения кросскорреляционных функций динамического спекл-поля зависит от интенсивности движения спеклов, которая, в свою очередь, определяется характером и видом исследуемой биоткани. Так, в частности, можно определять спелость и свежесть овощей и фруктов по анализу биоспекл-полей, образующихся при облучении биотканей зондирующим лазерным излучением [25]. В этих исследованиях принимали участие начальник метрологической службы ЛИТП ВНШФМА Жан-Луи Туо и молодая ученая Катрин Фуенте. Позднее оказалось, что подобным образом можно следить также за микроциркуляцией приповерхностного кровотока в биотканях и органах человека *in vivo*. Это направление стало предметом долговременного сотрудничества между ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси и Бело-

русским государственным медицинским университетом (БГМУ), и позднее, Белорусской медицинской академией последипломного образования (БелМАПО) [26; 27]. По этой тематике С. П. Рубникович и Ю. Л. Денисова защитили докторские диссертации по медицинским наукам в 2011 и 2014 гг. соответственно.

В предлагаемой монографии обобщены и систематизированы исследования авторов по разработке и практическому использованию аэрофизического эксперимента новых методов визуализации течений, основанных на спекл-технологиях (см., напр., [28–31]). Эти междисциплинарные работы на стыке лазерной физики, оптики, теплофизики, цифровых измерительных технологий, вычислительной математики, математической физики и ряда других научных направлений выполнялись в ИТМО НАН Беларуси как в инициативном порядке, так и в рамках важнейших государственных комплексных программ научных исследований «Наноструктурные материалы и технологии» (2006–2010), «Тепловые процессы» (2006–2010), программ и заданий НИР и НИОКР Энергия-20 «Исследование механизма переноса энергии в поглощающих, излучающих и рассеивающих неоднородных средах» (2001–2005), Диагностика-23 «Диагностика микроперемещений и деформации поверхности оптических и механических изделий методами электронной спекл-фотографии» (1996–2000), проекта INTAS-BELA 97-0083 «Спекл-фотография течений жидкостей и газов» (1998–2000), проектов INTAS 00-0135 «Новые методы анемометрии в механике жидкостей» (2001–2004), проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Б04М-082 «Лазерный мониторинг процессов переноса в биотканях» (2004–2006) и ряда других. Методической основой исследований является накопленный опыт цифровой регистрации лазерных спекл-изображений, переход на которые с фотографических и голографических систем начался в ИТМО НАН Беларуси в начале этого века. Цифровые системы регистрации и обработки изображений существенно расширили возможности лазерной диагностики как в технике, так и в биомедицине.

В процессе перехода на цифровые системы регистрации и обработки данных в работе принимали участие кандидаты наук Г. Н. Блинков, С. В. Власенко, Д. Э. Виткин, Е. С. Дрозд, Е. И. Лавинская, Е. Ф. Ноготов, С. А. Филатов, научные сотрудники, инженеры и техники О. В. Мелеева, Г. С. Кучинский, А. Н. Ознобишин, А. М. Братченя. На протяжении многих лет авторы имели возможность проводить совместные работы и обсуждать полученные результаты на различных международных конференциях с ведущими мировыми учеными в этой области. Мы искренне признательны докторам наук, профессорам Ф. Леопольду, Ю. Компенхансу (Германия), К. Грейтиду (Великобритания), П. Аррой (Испания), Ф. Скарано (Голландия), К. Маено, Т. Онорато и К. Такаяме (Япония), П. Воланскому и П. Дерферу (Польша), Ж.-М. Дессу, С. Мартемьянову, Ж.-Б. Солнье, Ж.-П. Тарану (Франция), К. Д. Киму, Г. Сетлсу и С. С. Ча (США), К. С. Киму (Южная Корея), Дж. Карломанье (Италия), И. А. Красовской (ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург), В. В. Голубу (ИВТ РАН, г. Москва) и академику НАН Беларуси С. А. Чижикю (ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск) за плодотворные обсуждения, благожелательную критику, полезные советы и рекомендации.

Выражаем признательность нашему руководителю, академику НАН Беларуси О. Г. Пенязькову, за поддержку работы, содействие выполнению исследований, ценные советы и рекомендации. Авторы надеются, что монография будет полезной научным работникам, а также инженерам, студентам и аспирантам, специализирующимся в области новой оптической диагностики, разработчикам новой лазерной диагностической техники, в том числе и для медицинского применения.

Методы СФ и спекл-интерферометрии (СИ) «родились» в рамках голографической интерферометрии и первое время пользовались теми же голографическими материалами и приемами первичной обработки информации [1–4; 8; 9; 11; 32]. Переход к цифровым спекл-технологиям еще более увеличил точность считывания первичных экспериментальных данных и объем получаемой информации. Данная монография описывает приемы

цифровой спекл-фотографии (ЦСФ), применяемые сегодня не только в СФ и СИ, но и в Тальбот-интерферометрии (ТИ), теневом фоновом методе (**Background Oriented Schlieren, BOS**) и технике PIV.

В последние годы защищены кандидатские и докторские диссертации [33–47], написаны книги и пособия по близким вопросам [32; 48–58].

Авторы весьма признательны доктору физ.-мат. наук Леониду Викторовичу Танину за редактирование настоящей монографии, полезные и продуктивные дискуссии, ценные рекомендации.

В Минске под руководством Л. В. Танина выросла школа по оптической голографии, голографической интерферометрии и их применению в биомедицине [59–68]. Выражаем еще раз искреннюю признательность Л. В. Танину и его коллегам по Институту физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси: академику НАН Беларуси В. С. Буракову, профессорам Б. М. Джагарову, А. П. Иванову, Н. В. Тарасенко, кандидатам наук В. В. Ажаронку и И. И. Филатовой за многолетние творческие контакты, полезные дискуссии и рекомендации.

В Саратове за короткий срок под руководством профессора Валерия Петровича Рябухо подготовлена целая научная школа по СФ и СИ [69–78]. Выражаем искреннюю признательность коллегам В. П. Рябухо из г. Москва, профессорам Г. Н. Вишнякову, Н. Г. Власову, Г. Г. Левину и И. С. Клименко за многочисленные продуктивные контакты во время научных конференций, дружеское участие, научные консультации и полезные рекомендации.

В Новосибирске под руководством члена-корреспондента РАН, профессора Дмитрия Марковича Марковича сложилась школа по применению техники PIV в аэрофизическом эксперименте и теплофизике [79–88]. Выражаем признательность Д. М. Марковичу и его коллегам из Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, директору Института, члену-корреспонденту РАН С. В. Алексеенко, академику РАН А. К. Реброву, профессорам Ю. Н. Дубнищеву и О. В. Шарыпову за многолетние продуктивные контакты, дружеские встречи на научных собраниях, полезные рекомендации. Сильная школа по оптической диагно-

стике газовых потоков и визуализации имеется также в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН и Новосибирском университете [35; 53; 54]. Искренне благодарим также академика РАН В. М. Фомина, профессоров В. М. Бойко, Г. М. Жаркову, А. М. Оришича, А. А. Павлова, В. В. Пикалова и Н. Г. Преображенского за многолетние продуктивные контакты, дружеские встречи на научных собраниях, полезные рекомендации.

В Москве на кафедре молекулярной физики физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова под руководством профессора И. К. Знаменской сложилась школа по визуализации газодинамических течений, включая визуализацию электрическим разрядом и теневым фоновым методом [34; 38; 41; 42; 48; 89–93]. Авторы выражают благодарность профессорам МГУ И. К. Знаменской, А. В. Приезжеву, А. В. Уварову, кандидатам наук Н. А. Винниченко и И. В. Мурсенковой за многочисленные продуктивные контакты во время научных конференций, научные консультации и полезные рекомендации. Сильная школа по рефрактографии и теневым фоновым методам сложилась также на кафедре физики им. В. А. Фабриканта в Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова в МЭИ под руководством Бронюса Симовича Ринкевичюса [33; 37; 43; 47; 52; 56–58; 94–96]. Авторы благодарят профессора Б. С. Ринкевичюса и доцентов кафедры физики Н. М. Скорнякову и И. Л. Расковскую за многолетние полезные контакты и благожелательные рекомендации.

В Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси под руководством академика НАН Беларуси О. Г. Пенязькова и доктора физико-математических наук П. П. Храмовца развивается школа по использованию эффекта Тальбота в диагностике газодинамических течений при участии канд. физ.-мат. наук И. А. Ших, младших научных сотрудников М. В. Дорошко и И. Н. Шатана [97–108]. Эти материалы включены в монографию, за что авторам оригинальных работ выражается глубокая признательность. Авторы также с большим удовольствием выражают благодарность кандидатам физ.-мат. наук П. Н. Кривошееву,

М. Ю. Черник, а также Н. Л. Евменчикову, К. Л. Севруку и всем сотрудникам лаборатории физико-химической гидродинамики за помощь на протяжении всего времени работы над книгой.

В заключении к краткому Предисловию мы должны сказать несколько слов о профессоре Вольфганге Мерцкирше и выразить ему свою глубочайшую признательность и благодарность. Прежде всего, потому, что первые эксперименты по СФ были начаты под его руководством [1–4]. К нашему великому сожалению, в те годы с помощью методов СФ удавалось получить информацию лишь в отдельных точках течения. И до визуализации всего течения было еще далеко. А все свои книги В. Мерцкирш называл «Визуализация течений» («Flow Visualization») [5]. Это его принципиальная позиция: «...понять, значит увидеть своими глазами». Недаром, в своей последней статье [109], он напоминает, что на многих языках мира выражение «я вижу», эквивалентно «я понимаю»<sup>1</sup>. В. Мерцкирш любит цитировать выражение Э. Маха в споре с Л. Больцманом о существовании атомов «...а Вы видели хоть один?»<sup>2</sup>. Выражение «очевидно» идет от латинского корня «*videre*», что означает «видеть». Таким образом, высшие достижения в оптической диагностике течений называются «визуализацией течений».

За 48 лет своего развития начиная с опытов Бурча и Токарского многие методы диагностики, основанные на компьютеризированных спекл-технологиях, достигли к настоящему времени такого уровня, что мы можем сказать, что это уже визуализация течений. Причем не просто визуализация, а количественная визуализация – что и вынесено в заглавие нашей книги. Теперь о «спекл-технологиях». В действительности, в двух из описываемых в монографии методах (Тальбот-интерферометрия и теневой фоновый метод) анализ течения осуществляется путем нахождения искривлений регулярных прямоугольных сеток. Математически процедура такого анализа оказывается идентичной поиску искривлений и деформации (случайных) спекл-полей, как в ме-

---

<sup>1</sup> На английском языке выражение «I see...» эквивалентно выражению «я понимаю...».

<sup>2</sup> Have you already seen one?

годах СФ, СИ и PIV. Поэтому мы называем такой анализ «спекл-технологией». Тем более, что в случае спекл-полей их числовая регистрация производится также на прямоугольных сетках, определяемых геометрией приемной ПЗС-матрицы.

Далее в монографии следует краткая вводная глава, которая начинается с описания опытов Бурча и Токарского, продолжается кратким описанием техники PIV и заканчивается введением в электронную и цифровую СФ. Во второй главе книги описывается открытие спекл-полей и дается краткая справка о применении биоспекл-полей в медицине. В конце главы приведены уравнения Максвелла и описаны оригинальные методы компьютерного трассирования зондирующего излучения через турбулентную среду. Третья глава монографии посвящена описанию дифракционных основ техники СФ, необходимых для понимания основного содержания монографии. В конце главы дан пример диагностики водородного топливного элемента. Четвертая глава посвящена описанию основных схем СФ и СИ. Описана пространственная фильтрация спеклограмм. Дано описание теневого фонового метода и томографической техники PIV. В конце главы приведены сведения о томографии течений. Пятая глава посвящена Тальбот-интерферометрии, а в шестой главе собраны все имеющиеся сведения о статистике спекл-полей.

В заключении монографии приведены сведения о главных научных собраниях специалистов по визуализации течений, Международных симпозиумов по визуализации течений (МС по ВТ). Отметим, что эти МС по ВТ организовали трое ученых, профессора Т. Асанума (Япония), В. Дж. Янг (США) и В. Мерцкирш. В настоящее время жив остался только В. Мерцкирш.

### Литература к Предисловию

1. *Fomin, N.* Speckle Photography of a Turbulent Density Field / N. Fomin, U. Wernekinck, W. Merzkirch // Book of Abstracts of IUTAM Symp. on Optical Methods in the Dynamics of Fluids and Solids. Czechoslovak Acad. of Sci. – Czechoslovakia, 1984. – P. 38.

2. *Вернекинг, У.* Спекл-техника восстановления газодинамических полей в турбулентных реагирующих потоках / У. Вернекинг, В. Мерцкирш, Н. Фо-

...И сказал Бог: да будет свет. И стал свет.  
И увидел Бог свет, что он хорош, и отделил  
Бог свет от тьмы.

*Ветхий завет. Бытие 1.*

## *Глава I*

---

# **ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ОПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

## **1.1. Опыты Бурча и Токарского**

В 1968 г. Бурч и Токарский (Национальная физическая лаборатория, Тедингтон, Великобритания) [1] экспериментально показали, что два спекл-поля, сдвинутых друг относительно друга на небольшое расстояние (порядка нескольких диаметров спеклов), ведут себя как экран в экспериментах Томаса Юнга<sup>1</sup> с двумя отверстиями, расстояние между которыми в точности равно величине сдвига спекл-полей. Эти опыты открыли дорогу не только спекл-фотографии, но и большому количеству методов, основанных на спекл-технологиях, таких как спекл-интерферометрия, Тальбот-интерферометрия, техники BOS, PIV и многим другим.

Схема экспериментов Томаса Юнга<sup>2</sup> представлена на рис. 1.1, взятом из публикаций изобретателей голографии: нобелевской лекции Дениса Габора (1900–1979), работавшего в Королевском колледже науки и техники в Лондоне, и из статьи Юрия Николаевича Денисюка (1927–2006), в которой они описывают историю изобретения голографии. Ю. Н. Денисюк работал в Государственном оптическом институте (г. Санкт-Петербург, Россия).

<sup>1</sup> Thomas Young (1773–1829) – английский физик, оптик, доказавший волновую природу света.

<sup>2</sup> The Bakerian Lecture: On the Theory of Light and Colours / T. Young // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1802. – Vol. 92. – P. 12–48.

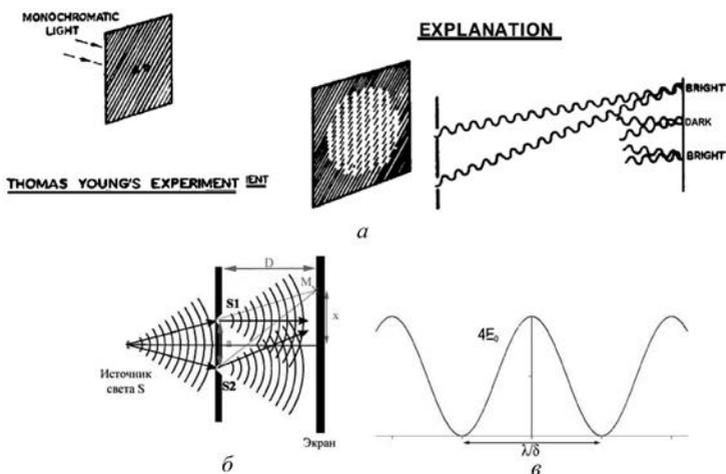


Рис. 1.1. Классический эксперимент Томаса Юнга: *a* – рисунок из публикаций [2; 3]; *б* – схема интерферометра Юнга; *в* – вид интерференционных полос

Термин «спекл» (в переводе с английского «пятнышко») используется с начала 1960-х годов, возник этот термин в рамках голографии, которая использовала лазеры для подсветки и высокоразрешающие голографические фотопластинки для регистрации голограмм. Этот спекл может быть микронного размера, и он не всегда виден, но все, кто работал с непрерывным лазе-

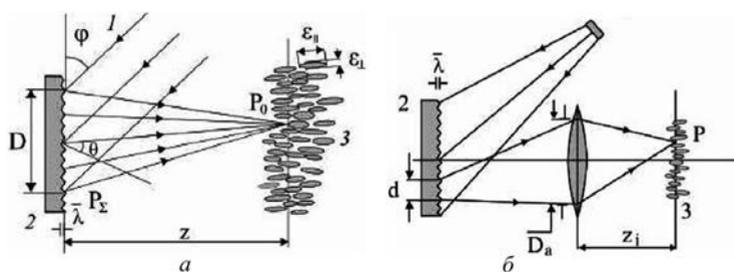


Рис. 1.2. Оптическая схема наблюдения объективной спекл-картины в случае дифракции лазерного пучка на шероховатой поверхности (*a*); схема формирования субъективной спекл-картины (*б*): *1* – падающее излучение; *2* – случайно-неоднородный объект; *3* – схематичный вид продольного сечения слоя спекл-структуры [4]

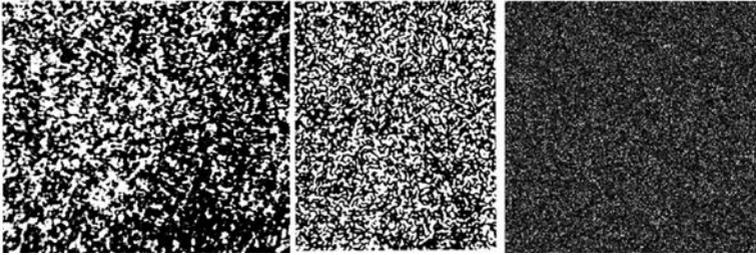


Рис. 1.3. Характерные образцы спекл-полей при увеличении

ром видимого спектра, включая лазерные указки, хорошо знают, о чем идет речь.

На рис. 1.2 показаны два пути образования спекл-поля, объективный, без линз, и субъективный, когда в процессе образования спекл-поля участвуют линзы. На рис. 1.3 показаны три типичных спекл-поля, снятых при различном увеличении. Вот именно с такими спекл-полями и имели дело Бурч и Токарский, когда им удалось воспроизвести знаменитый опыт Томаса Юнга (рис. 1.4), на котором два спекл-поля со сдвигом на несколько диаметров спеклов были зафиксированы на одной фотопластине высокого разрешения. Теперь, если просветить дважды заэкспонированное спекл-поле лучем непрерывного лазера, то на экране за спеклограммой мы увидим интерференционные полосы, точно такие же, какие видел Томас Юнг (рис. 1.5).

Чем же так поразил опыт Т. Юнга изобретателей голографии? Вот как его комментирует Д. Габор. В основе голографии лежит волновая природа света. Волновые свойства света были впервые обнаружены и наглядно продемонстрированы Т. Юнгом с помощью простого опыта (рис. 1.1).

Во время доклада на заседании Лондонского Королевского общества, Юнг пропу-

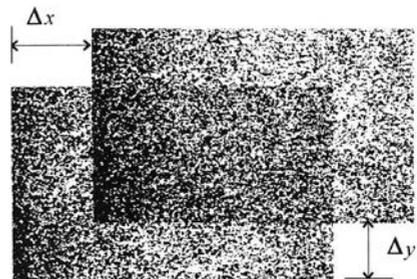


Рис. 1.4. Два спекл-поля, со сдвигом на  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$ , зарегистрированные на одной голограмме (спеклограмме)

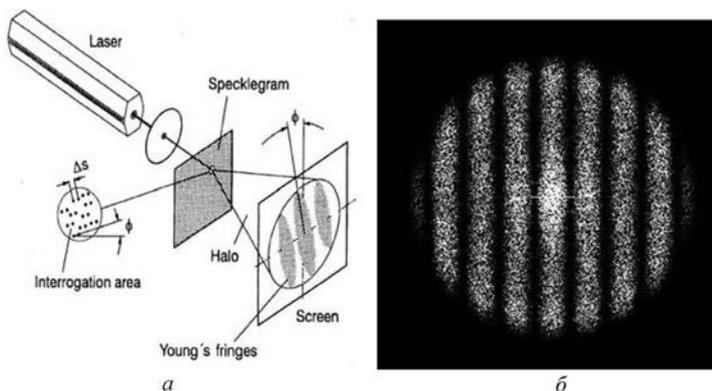


Рис. 1.5. Расшифровка спеклограммы методом полос Юнга: *а* – лазер, спекл-голограмма, экран с полосами Юнга; *б* – спектр двух идентичных смещенных относительно друг друга спекл-структур – интерференционные полосы Юнга

стил солнечные лучи в темное помещение и на их пути расположил два экрана: темный, с двумя точечными отверстиями, и белый (на некотором расстоянии позади первого). По обе стороны от яркой линии на белом экране он увидел две темноватые полосы, что привело к решению повторить опыт. Хотя и первый опыт был сравнительно удачен. Во время второго опыта Т. Юнг воспользовался спиртовой горелкой и добавил в ее пламя небольшое количество поваренной соли для получения яркого желтого излучения натрия в качестве источника света. На экране возникла картина из регулярно расположенных темных полос.

Этот эксперимент явился убедительным доказательством того, что наложение света может образовывать темноту. Данное явление называется интерференцией, и Юнг предвидел его, поскольку в своих рассуждениях исходил из волновой теории света. Томас Юнг интуитивно полагал, что монохроматический свет представляет собой регулярные синусоидальные колебания среды (которую в то время называли эфиром), и тем самым внес существенный вклад в исходную идею Христиана Гюйгенса<sup>1</sup> (1629–1695). И если это предположение соответствует действи-

<sup>1</sup> Христиан Гюйгенс ван Зейлихем (Christian Huygens) – нидерландский физик.

тельности, то повышение яркости света должно возникать при сложении гребня одной волны, с гребнем другой и ослаблением яркости до темноты – при сложении гребня с впадиной.

Свет, способный интерферировать, называется когерентным. Лорд Реллей (1842–1919) и Альберт Майкенсон (1852–1931) впервые выяснили, что длина когерентности является величиной, обратной ширине спектральной линии.

Вернемся к эксперименту Бурча и Токарского. В опыте [1] матовое стекло или любую шероховатую поверхность освещали лазером и регистрировали спекл-структуру на фотопластинке (рис. 1.6). Спекл-структура в плоскости фотопластинки характеризуется пространственной функцией  $D(\xi, \eta)$ , описывающей распределение интенсивности света в этой плоскости. Будем считать, что интенсивность  $D(\xi, \eta)$  такова, что амплитудное пропускание проявленного негатива не выходит из области линейности фотоматериала – голографической пластинки. В этом случае амплитудное пропускание негатива со спекл-картинкой можно записать  $t = a - bD(\xi, \eta)$ , где  $a, b$  – константы, зависящие от свойств используемой фотоэмульсии.

Сделаем теперь не одну, а две одинаковые по времени экспозиции, сместив в промежутке фотопластинку на  $\Delta_x$ . Регистрируемая на фотопластинке интенсивность лазерного излучения будет равна  $D(\xi, \eta) + D(\xi + \Delta_x, \eta)$ . Так как смещение эквивалентно свертке с дельта-функцией, регистрируемую интенсивность можно записать в виде

$$D(\xi, \eta) * [\delta(\xi, \eta) + \delta(\xi + \Delta_x, \eta)]. \quad (1.1)$$



Рис. 1.6. Схема регистрации спекл-картинки в опытах Бурча и Токарского (а) и кривая почернения фотопластинки под действием экспозиции (б) [1]

Таким образом, если на фотопластинке высокого разрешения зарегистрировать два изображения одной и той же спекло-вой структуры (например, от матового стекла) со сдвигом в пространстве на  $\Delta_x$ , то получится негатив с амплитудным коэффициентом пропускания вида

$$t(\xi, \eta) = a - bD(\xi, \eta) * [\delta(\xi, \eta) + \delta(\xi + \Delta_x, \eta)], \quad (1.2)$$

где  $t(\xi, \eta)$  – распределение интенсивности в спекловой структуре. Пространственный спектр зарегистрированной картины будет иметь вид

$$\bar{t}(u, v) = F[t(\xi, \eta)] = a\delta(u, v) - b\bar{D}(u, v)[1 + \exp(i2\pi u\Delta_x / \lambda)],$$

где  $\bar{D}(u, v)$  – фурье-образ функции, а  $u, v$  – угловые координаты в фокальной плоскости.

При освещении негатива параллельным пучком лучей в фокальной плоскости линзы  $O$  можно получить изображение этого спектра. Член  $a\delta(u, v)$  соответствует (если пренебречь дифракцией) изображению точечного источника, расположенного на бесконечности. Это изображение локализовано в фокусе  $F$ . Второй член представляет собой (умноженный на константу  $b$ ) фурье-образ  $\bar{D}(u, v)$  функции  $D(u, v)$ , модулированный функцией  $[1 + \exp(i2\pi u\Delta_x / \lambda)]$ . Диффузор  $D(u, v)$  имеет очень тонкую структуру, а поэтому его фурье-образ  $\bar{D}(u, v)$  сильно растягивается в фокальной плоскости линзы  $O$  (рис. 1.5).

Фурье-образ  $\bar{D}(u, v)$ , как и сама функция  $D(u, v)$ , тоже описывает некую спекл-структуру. Если пренебречь изображением источника в фокусе  $F$ , то во всей остальной части фокальной плоскости интенсивность света с точностью до постоянного множителя будет равна

$$I(u, v) = |D(u, v)|^2 |1 - \exp(i2\pi u\Delta_x / \lambda)|^2 = |D(u, v)|^2 \cos^2(\pi u\Delta_x / \lambda).$$

Таким образом, диффузный фон  $|\bar{D}(u, v)|$  оказывается модулированным функцией  $\cos^2(\pi u\Delta_x / \lambda)$ , описывающей полосы Юнга. Угловое расстояние между двумя соседними полосами равно  $\lambda / \Delta_x$ . Например, при смещении на 20 мкм угловое расстояние между двумя светлыми полосами составляет  $1^\circ 42'$ .

Сделаем ряд экспозиций с одинаковыми временами и одинаковыми смещениями фотопластинки (в одном и том же направлении) в промежутке между экспозициями. Если число экспозиций равно  $N + 1$ , то регистрируемая интенсивность будет равна свертке

$$D(\xi, \eta) \otimes \sum_{n=0}^{N+1} \delta(\xi + n\Delta_x, \zeta).$$

Если осветить негатив, то в произвольной точке  $(u, v)$  фокальной плоскости линзы  $O$  амплитуда будет определяться фурье-образом. Если не учитывать изображения источника в фокусе  $F$ , то с точностью до постоянного множителя для интенсивности будем иметь выражение

$$I(u, v) = |\bar{D}(u, v)|^2 \left\{ \frac{\sin[(N + 1)2\pi u\Delta_x / \lambda]}{\sin(2\pi u\Delta_x / \lambda)} \right\}^2.$$

Спектр, наблюдаемый в фокальной плоскости линзы  $O$ , будет таким же, как и спектр дифракционной решетки с периодом  $\Delta_x$  и числом штрихов  $N + 1$ . Между двумя главными максимумами располагается  $N - 1$  вторичных максимумов (рис. 1.7).

Таким образом, Бурч и Токарский повторили классический опыт Юнга, но не с двумя отверстиями на экране, сдвинутыми друг относительно друга на небольшое расстояние  $\Delta_x$ , а с двумя

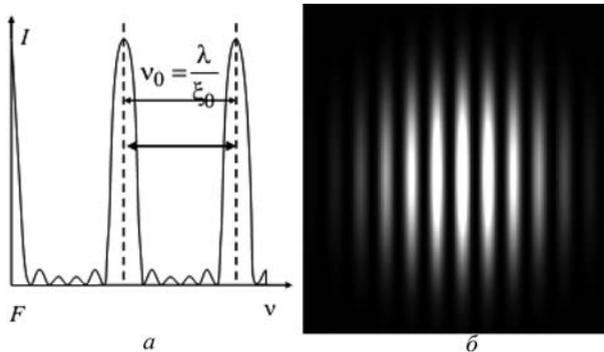


Рис. 1.7. Спектр для случая нескольких экспозиций с одинаковым смещением (а) и смоделированные на компьютере интерференционные гало (полосы Юнга) (б). Яркое центральное пятно исключено

изображениями одной и той же спекл-структуры со сдвигом в пространстве на  $\Delta_x$ . В этих экспериментах они дважды зарегистрировали спекл-поле по схеме, показанной на рис. 1.6, а. Если предположить, что спекл-поле формируется в результате равномерного освещения диффузора (например, матового стекла) шириной  $L$ , то размер объективных спеклов, наблюдаемых на расстоянии  $z$  от диффузора, пропорционален  $\frac{\lambda z}{L}$ . Образованное в плоскости фотослоя изображение промодулировано случайной картиной спеклов, имеющих характерный размер, определяемый апертурой оптической системы  $b_z \approx 1,22\lambda \frac{l_1}{D}$ . Распределение освещенности в задней фокальной плоскости линзы состоит из яркого центрального пятна, окруженного картиной спеклов, промодулированной полосами с косинусоидальным распределением интенсивности. Яркое центральное пятно образовано недифрагированным светом, прошедшим через фотопластинку, а модулированная картина спеклов образуется светом, дифрагирующим на спекл-структуре, зарегистрированной на фотопластинке. Полосы с косинусоидальным распределением образуются в результате того, что каждая пара спеклов действует как пара идентичных источников когерентного света, которые образуют полосы Юнга. Если спеклы в каждой паре на фотоснимке разделены промежутком  $d_s = \Delta_x$ , расстояние между полосами составляет  $d_f = \frac{\lambda f_T}{d_s}$ .

Поэтому перемещение объекта в плоскости равно  $L = \frac{\lambda f_T}{M d_f}$ , где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения, используемого для образования полос;  $f_T$  – фокусное расстояние линзы, осуществляющей преобразование;  $M$  – увеличение оптической системы, использованной при получении спекл-фотографии;  $d_f$  – расстояние между полосами.

Сферическая волна, распространяющаяся от точечного источника, преобразуется в сходящуюся сферическую волну с центром  $S'$  – геометрическое изображение точечного источника  $S$ .

Структура пятна, вид дифракционной картины зависят от формы отверстия, образуемого оправой объектива. Пусть отвер-

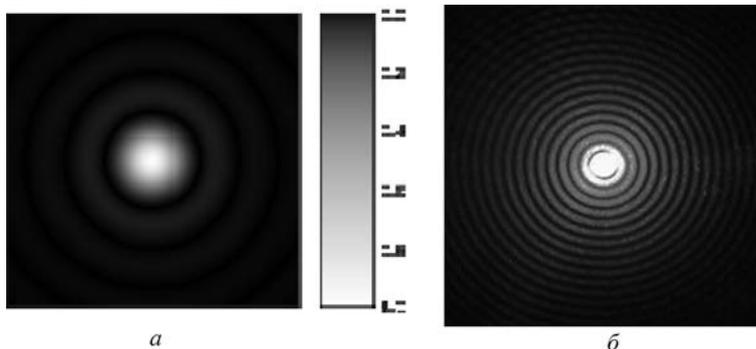


Рис. 1.8. Созданное компьютером изображение диска Эйри. Интенсивность серого цвета была изменена, чтобы усилить яркость внешних кругов узора Эйри (а). Картина дифракции, созданная прохождением лазерного луча с длиной волны 650 нм, через точечное отверстие диаметром 0,2 мм (б)

стие круглое, а его диаметр  $2a$ , тогда в плоскости изображения  $\pi'$  амплитуда дается фурье-преобразованием круговой функции. Амплитуда в точке  $P$  дается функцией Эйри:

$$f(v) = \frac{2J_1(z)}{z},$$

где  $z = kav$ ,  $k = 2\pi / \lambda$ , а угловой радиус первого кольца  $v = 1,22\lambda / 2a$ .

Дифракционный узор, возникающий при прохождении света через равномерно освещенное круглое отверстие, имеет яркую область в центре, известную как диск Эйри (рис. 1.8, 1.9, см. цв. вклейку). В целом дифракционный узор, включающий пятно и концентрические яркие кольца вокруг него, известен как узор Эйри. Эти явления получили название в честь Джорджа Бидделя Эйри. Данное оптическое явление само по себе было известно еще до Эйри. Например, Джон Гершель<sup>1</sup> в статье о свете в «Encyclopaedia Metropolitana» в 1828 г. так описывал вид яркой звезды через телескоп с большим увеличением: «...в благоприятных условиях, при спокойной атмосфере, равномерной температуре воздуха и т. д., звезда видна как совершенно круглый, четко определенный

<sup>1</sup> *Herschel, J. F. W. Light / J. F. W. Herschel // Transactions Treatises on physical astronomy, light and sound contributed to the Encyclopaedia Metropolitana. – Richard Griffin & Co., 1828. – P. 491.*

планетарный диск, окруженный двумя, тремя или большим количеством чередующихся темных и светлых колец, которые, если их хорошо рассмотреть, также представляются слегка окрашенными у своих границ. Они следуют друг за другом вокруг центрального диска практически с равным интервалом...

Однако именно Эйри впервые произвел полный теоретический анализ явления и дал ему объяснение в своей работе 1835 г. «О дифракции в объективе с круговой апертурой»<sup>1</sup>.

Первоначально к спеклам (микропятнам) на оптических изображениях в когерентном свете относились как к появлению нежелательного шума. Многие исследователи старались подавить этот спекл-шум, однако после публикации результатов экспериментов Бурча и Токарского [1] открылись новые потенциальные возможности практического использования этого спекл-шума в новых измерительных технологиях.

Последовал взрыв научных публикаций и к началу 1980-х годов появились обзоры, сборники и даже монографии, обобщающие первые сотни публикаций в новой области знаний, спекл-метрологии. Хотя значительная часть этих публикаций была посвящена голографии и голографической интерферометрии, а также спекл-анемометрии течений, которая в настоящее время называется PIV (см. разделы 1.3 и 4.4).

## 1.2. Краткий обзор литературы

Термин «спекл» появился сразу вслед за появлением лазеров в начале 1960-х годов. Физической основой техники спекл-фотографии (СФ) является явление дифракции. Рассмотрим основные законы дифракции, следуя публикациям [5–84]. Первой отечественной книгой по современной оптике является монография, первое издание которой вышло в 1940 г. [5]. Это книга академика Григория Самуиловича Ландсберга (1890–1957). Основным материалом для книги послужили лекции автора, появив-

---

<sup>1</sup> *Airy, G. B. On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture / G. B. Airy // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. – 1835. – Vol. 5. – P. 283–291.*

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>Предисловие</b> .....  | 3  |
| <b>Список основных обозначений</b> .....  | 19 |
| <b>Список сокращений</b> .....  | 22 |
| <b>Глава 1. Введение в технику оптической визуализации</b> .....  | 25 |
| 1.1. Опыты Бурча и Токарского .....   | 25 |
| 1.2. Краткий обзор литературы .....   | 34 |
| 1.3. Техника PIV .....  | 39 |
| 1.4. Электронная спекл-фотография .....   | 44 |
| 1.5. Цифровая спекл-фотография .....  | 49 |
| <b>Глава 2. Основные свойства когерентного света</b> .....  | 62 |
| 2.1. Образование спекл-поля .....   | 62 |
| 2.2. Спекл объективный и субъективный .....   | 67 |
| 2.3. Открытие биоспекл-полей .....  | 69 |
| 2.3.1. Первые наблюдения биоспекл-полей .....   | 69 |
| 2.3.2. Работы профессора Бриерса .....  | 70 |
| 2.3.3. Методики измерения кровотока в работах японских научно-исследовательских групп .....                                       | 75 |
| 2.3.4. Измерители кровотока по методике доктора Б. Рута .....   | 78 |
| 2.3.5. Измерения микроциркуляции по методикам группы профессора В. В. Тучина .....  | 80 |
| 2.3.6. Разработки доктора физико-математических наук Л. В. Танина (ЗАО «Голографическая индустрия», г. Минск) в биомедицине ..... | 82 |
| 2.3.7. Системы цифровой регистрации биоспекл-полей в БГМУ и ИТМО НАН Беларуси .....   | 87 |
| 2.4. Элементы теории дифракции .....  | 93 |
| 2.4.1. Изображение точечного источника света .....  | 93 |
| 2.4.2. Изображение точечного источника света при небольшой дефокусировке .....  | 95 |
| 2.4.3. Изображение двух монохроматических точечных источников света .....   | 95 |
| 2.4.4. Изображение большого числа монохроматических точечных источников, расположенных хаотически .....                           | 97 |

|  |            |
|--|------------|
| 2.4.5. Спектр большого числа когерентных точечных источников, образующих идентичные, одинаково ориентированные и хаотически расположенные пары . . . . . | 98         |
| 2.4.6. Размеры спекл-структур . . . . .  | 99         |
| 2.4.7. Дифракция Фраунгофера на спекл-поле . . . . .   | 102        |
| 2.5. Уравнения Максвелла . . . . .   | 104        |
| 2.6. Трассирование лазерного излучения в схемах спекл-фотографии   | 107        |
| 2.6.1. Расчет траектории лазерного луча . . . . .  | 107        |
| 2.6.2. Интегральное преобразование Абеля . . . . .   | 110        |
| 2.6.3. Приближение Убероя и Коважного . . . . .  | 111        |
| 2.6.4. Интегральное преобразование Эрбека–Мерцкирша . . . . .  | 115        |
| 2.7. Диагностика параметров турбулентности по данным спекл-фотографии . . . . .  | 122        |
| <b>Глава 3. Дифракционные основы техники . . . . .</b>   | <b>137</b> |
| 3.1. Опыты Гримальди . . . . .   | 137        |
| 3.2. Принцип Гюйгенса–Френеля . . . . .  | 140        |
| 3.3. Дифракция Френеля . . . . .   | 141        |
| 3.3.1. Зоны Френеля . . . . .  | 141        |
| 3.3.2. Картина дифракции на отверстиях (щели) и на диске (тонкой проволоке) . . . . .  | 144        |
| 3.3.3. Спираль Френеля и Корню . . . . .   | 150        |
| 3.4. Дифракция Фраунгофера . . . . .   | 159        |
| 3.5. Дифракция Фраунгофера на отверстиях или щели . . . . .  | 161        |
| 3.6. Дифракция гауссова пучка . . . . .  | 168        |
| 3.7. Дифракция Фраунгофера на двух одинаковых отверстиях или щелях . . . . .   | 170        |
| 3.8. Границы применимости различных приближений в теории дифракции . . . . .   | 173        |
| 3.9. Лазеры для спекл-интерферометров . . . . .  | 176        |
| 3.9.1. Мощность лазеров для анемометрии . . . . .  | 178        |
| 3.9.2. Источники излучения с малой длиной когерентности . . . . .  | 179        |
| 3.10. Основные приемы и алгоритмы обработки цифровых изображений . . . . .   | 183        |
| 3.10.1. Построение окон для усреднения . . . . .   | 183        |
| 3.10.2. Фильтрация изображений . . . . .   | 184        |
| 3.10.3. Кросскорреляционный анализ последовательных изображений . . . . .  | 186        |
| 3.10.4. Автокорреляционный анализ изображений с продолжительным временем экспозиции . . . . .  | 188        |
| 3.10.5. Анализ контраста изображений с продолжительным временем экспозиции . . . . .   | 190        |
| 3.10.6. Техника Гуи–Мерцкирша . . . . .  | 192        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.10.7. Статистический анализ погрешностей определения смещений спекл-полей . . . . . | 193        |
| 3.10.8. Динамические свойства спекл-полей. . . . .                                    | 194        |
| 3.11. Диагностика течений в РЕМ-топливном элементе . . . . .                          | 198        |
| 3.11.1. Структура и геометрия каналов в РЕМ-топливном элементе . . . . .              | 198        |
| 3.11.2. Пространственное разрешение . . . . .   | 200        |
| 3.11.3. Временное разрешение . . . . .  | 201        |
| 3.11.4. Анализ структуры течения в топливном элементе . . . . .                       | 202        |
| 3.11.5. Выводы . . . . .  | 203        |
| <b>Глава 4. Основные приемы спекл-интерферометрии . . . . .</b>                       | <b>208</b> |
| 4.1. Метод двухэкспозиционной спекл-фотографии. . . . .                               | 208        |
| 4.1.1. Показатель преломления в газах . . . . .                                       | 208        |
| 4.1.2. Отклонение световых лучей на градиентах плотности . . . . .                    | 211        |
| 4.1.3. Кросскорреляционный анализ последовательных изображений . . . . .              | 217        |
| 4.2. Метод пространственной фильтрации спеклограммы . . . . .                         | 228        |
| 4.3. Корреляционная спекл-интерферометрия и спекл-фотография. . . . .                 | 235        |
| 4.3.1. Спекл-фотография через сложную апертуру . . . . .                              | 235        |
| 4.3.2. Спекл-интерферометрия с опорным пучком . . . . .                               | 240        |
| 4.3.3. Электронная спекл-интерферометрия. . . . .                                     | 246        |
| 4.3.4. Спекл-фотография «в белом свете». . . . .                                      | 247        |
| 4.4. Теневой фоновый метод (BOS). . . . .   | 248        |
| 4.5. Томографическое PIV . . . . .  | 255        |
| 4.5.1. Краткий обзор литературы по PIV . . . . .                                      | 255        |
| 4.5.2. Кросскорреляционный анализ изображений в PIV . . . . .                         | 256        |
| 4.5.3. Формирование изображений визуализирующих частиц . . . . .                      | 257        |
| 4.5.4. Визуализирующие частицы в технике микро-PIV . . . . .                          | 258        |
| 4.5.5. Плотность введения визуализирующих частиц. . . . .                             | 258        |
| 4.5.6. Стереоскопическая техника PIV . . . . .  | 259        |
| 4.5.7. Голографическая техника PIV . . . . .  | 259        |
| 4.5.8. Спекл-кинематография (speckle streak velocimetry, SSV) . . . . .               | 262        |
| 4.5.9. Томографические приемы в технике PIV . . . . .                                 | 264        |
| 4.6. Спекл-томография . . . . .   | 265        |
| 4.6.1. Диагностика на просвет. . . . .  | 265        |
| 4.6.2. Интегральное преобразование Радона . . . . .                                   | 266        |
| 4.6.3. Связь с другими интегральными преобразованиями . . . . .                       | 269        |
| 4.6.4. Алгоритмы вычислений преобразования Радона . . . . .                           | 270        |
| 4.6.5. Основные схемы газодинамических томографов . . . . .                           | 273        |
| 4.6.6. Результаты моделирования. . . . .  | 279        |
| 4.6.7. Экспериментальные результаты. . . . .  | 280        |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Глава 5. Тальбот-интерферометрия</i> . . . . .  | 301 |
| 5.1. Самовоспроизведение изображений решетки . . . . .   | 301 |
| 5.2. Эффект Муара . . . . .  | 305 |
| 5.3. Решетки Ронки и диафрагма Ричи . . . . .  | 308 |
| 5.4. Тест Ронки . . . . .  | 309 |
| 5.5. Интерферометр Тальбота и Тальбота–Лоу с решетками Ронки. . . . .                                      | 311 |
| 5.6. Эксперименты в ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси . . . . .   | 313 |
| 5.7. Эксперименты Шандры Шакера (Индия) . . . . .  | 315 |
| 5.8. Другие эксперименты с интерферометрами на основе эффекта Тальбота . . . . .                           | 316 |
| <br>   |     |
| <i>Глава 6. Статистические свойства спекл-полей и методы измерений, основанные на их анализе</i> . . . . . | 323 |
| 6.1. Особенности лазерного излучения . . . . .   | 323 |
| 6.1.1. Генерация лазерного излучения . . . . .   | 323 |
| 6.1.2. Волновая природа излучения . . . . .  | 323 |
| 6.1.3. Направленность излучения . . . . .  | 324 |
| 6.1.4. Монохроматичность и модовый состав . . . . .  | 325 |
| 6.1.5. Когерентность . . . . .   | 326 |
| 6.2. Образование спекл-поля . . . . .  | 327 |
| 6.3. Линейно поляризованное излучение . . . . .  | 331 |
| 6.4. Суммирование спекл-полей . . . . .  | 335 |
| 6.5. Сложение с когерентным фоном . . . . .  | 342 |
| 6.6. Автокорреляционные функции . . . . .  | 344 |
| 6.7. Усреднение приемником . . . . .   | 346 |
| 6.8. Влияние структуры рассеивающей поверхности и немонахроматичности излучения . . . . .                  | 348 |
| 6.9. Измерение шероховатости поверхности . . . . .   | 351 |
| 6.10. Динамические параметры в статистике лазерных спекл-полей. . . . .                                    | 356 |
| 6.11. Трансляция и кипение спеклов . . . . .   | 358 |
| 6.12. Влияние процессов многократного рассеивания на формирование и динамику биоспекл-полей . . . . .      | 360 |
| 6.12.1. Формирование двойного биоспекл-поля . . . . .  | 360 |
| 6.12.2. Статика двойных спекл-структур . . . . .   | 362 |
| 6.12.3. Динамические двойные спекл-структуры. Безлинзовая геометрия . . . . .                              | 363 |
| 6.12.4. Изображение двойных динамических спекл-структур с помощью линзы . . . . .                          | 364 |
| 6.13. Многоскоростные приближения . . . . .  | 368 |
| 6.14. Динамические режимы спекл-полей. Трансляция и кипение спеклов . . . . .                              | 369 |
| 6.15. Формирование спекл-поля сложной оптической системой . . . . .  | 373 |
| 6.16. Динамические параметры биоспекл-полей в различных оптических конфигурациях . . . . .                 | 375 |
| <b>Заключение</b> . . . . .  | 383 |

Научное издание

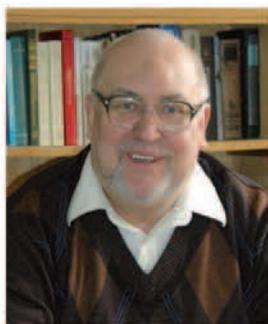
**Базылев Николай Борисович**  
**Фомин Никита Александрович**

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЙ ,  
ОСНОВАННАЯ НА СПЕКЛ-ТЕХНОЛОГИЯХ**

Редактор *Т. П. Петрович*  
Художественный редактор *Т. Д. Царева*  
Технический редактор *О. А. Толстая*  
Компьютерная верстка *Н. И. Кашуба*

Подписано в печать 21.10.2016. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 22,9+1,86 вкл. Уч.-изд. л. 19,7.  
Тираж 100 экз. Заказ 212.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская  
навука». Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013.  
Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.



**ФОМИН Никита Александрович** – главный научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Доктор физико-математических наук (1985 г.), профессор (1991 г.), специалист в области оптической диагностики быстротекущих процессов, высокотемпературной газовой динамики, физики ударных волн, горения, взрыва. Имеет более 400 опубликованных работ, в том числе 7 монографий, 17 препринтов, 28 авторских свидетельств СССР и один патент Республики Беларусь. В 2009 г. награжден медалью имени Франциска Скорины.

Лауреат премии имени академика В. А. Коптюга (2008 г.), премии НАН Беларуси за лучшую монографию 2010 года. Удостоен медалей Международного института динамики взрыва и реагирующих систем имени Р. И. Солоухина «Золотые руки» (2013 г.), Международного симпозиума по визуализации течений имени Леонардо да Винчи (2014 г.) и Международного института горения имени Б. Е. Гельфанда (2014 г.).



**БАЗЫЛЕВ Николай Борисович** – кандидат физико-математических наук. В 1998 г. окончил Белорусский государственный университет. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 2008 г. – старший научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Автор около 50 научных работ. Специалист в области оптических методов диагностики. Лауреат стипендии Президента Республики Беларусь для талантливых молодых ученых (2008 г.).

ISBN 978-985-08-2065-5



9 789850 820655 >