

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Саровский физико-технический институт -
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

Физико-технический факультет

Кафедра «Специальное приборостроение»

С.А. ВОРОНОВ, С.И. ГЕРАСИМОВ, Д.Ю. СМИРНОВ, Н.А. ТРЕПАЛОВ

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С
ПОМОЩЬЮ ТЕНЕВОГО ФОНОВОГО МЕТОДА**

Учебно-методическое пособие
для студентов и аспирантов вузов

*Рекомендовано Научно-методическим советом
Саровского физико-технического института (СарФТИ) НИЯУ МИФИ
в качестве учебного пособия для студентов вузов*

Саров 2025

УДК 535.8
В42

Визуализация оптических неоднородностей с помощью теневого фонового метода : учебно-методическое пособие для студентов и аспирантов вузов / С.А. Воронов, С.И. Герасимов, Д.Ю. Смирнов, Н.А. Трепалов. - Саров, СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2025. – 22 с. : ил.

Ключевые слова: визуализация быстропротекающих процессов, теневой фоновый метод, некогерентный источник света, кросскорреляционный алгоритм, оптическая неоднородность.

Учебно-методическое пособие предназначено для подготовки и проведения практических занятий по курсам «Средства испытаний приборов и систем автоматики», «Физические основы получения информации», «Основы аэродинамики и теории полета». В пособии рассмотрены основы современного бесконтактного оптического метода получения информации о быстропротекающем процессе, представлен теневой фоновый метод (ТФМ). Дано теоретическое обоснование ТФМ, а также приведена практическая часть по применению алгоритмов обработки изображений. Изложение материала систематизировано, иллюстрировано схемами, рисунками, таблицами.

Пособие может быть полезно также при изучении других инженерно-технических дисциплин, где используется научная визуализация.

01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы

14.05.04 Электроника и автоматика физических установок

15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Воронов Сергей Алексеевич, с.н.с. ГК «Росатом», д.т.н.; **Герасимов Сергей Иванович**, нач. отдела ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», профессор кафедры «Специальное приборостроение» СарФТИ НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессор; **Смирнов Дмитрий Юрьевич**, Институт цифровых технологий ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», кафедра «Цифровые технологии» СарФТИ НИЯУ МИФИ; **Трепалов Николай Александрович**, в.н.с. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», к.т.н.

Рецензент: директор ИПМ РАН, д.ф.-м.н., профессор **Ерофеев Владимир Иванович**.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Физические основы получения информации» изучается студентами большинства специальностей технических вузов как общепрофессиональная дисциплина. Курс закладывает основы профессиональных знаний и умений, позволяющих решать задачи, связанные с оптическими методами исследования потоков. Теневой фоновый метод находит применения во многих областях исследований. С его помощью возможно получение как качественных, так и количественных визуализаций процессов горения, тепломассопереноса, перераспределения плотности воздуха. Основным фактором, определяющим его применение в различных областях, является предельная простота установки в сочетании с высокой чувствительностью.

В учебно-методическом пособии рассматриваются сущность метода, практическая реализация теневого фонового метода, применение метода.

Учитывая возрастающую в настоящее время роль в учебном процессе доли научных исследований, автор описывает работы, сделанные на базе кафедры «Специальное приборостроение» СарФТИ НИЯУ МИФИ.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретические сведения	5
1.1 Схема регистрации.....	5
1.2 Чувствительность схемы регистрации	7
1.3 Оптическое пространственное разрешение	8
2. Алгоритмы обработки изображений	10
2.1 Кросскорреляционный алгоритм	10
2.2 Вычисление разности между кадрами	11
3. Влияние параметров схемы регистрации на результат визуализации	12
Список источников	22

ВВЕДЕНИЕ

Развитие цифровых методов хранения и обработки данных и, позднее, цифровой фото-видеорегистрации существенно расширило возможности оптических методов, сделало их более удобными для экспериментального применения. Применение автоматизированной цифровой обработки к первичным экспериментальным данным позволяет существенно увеличить качество и количество информации об изучаемых физических явлениях, обеспечить долговременное хранение данных и сопоставление результатов экспериментов, проводившихся в аналогичных условиях. Одним из таких примеров является теневой фоновый метод (ТФМ). В англоязычной литературе он известен как *background oriented schlieren* (BOS). Автором метода является Gerd E.A. Meier [1]. Свое современное название метод получил после длительной дискуссии на IX Международном симпозиуме по визуализации течений в г. Эдинбурге (2000 г.). Перевод этого названия на русский язык кратко обсуждался на симпозиумах по оптическим методам исследования потоков (ОМИП) под руководством проф. Б. С. Ринкевичуса.

Отличительной чертой ТФМ является простота его реализации. Схема регистрации ТФМ состоит из некогерентного источника света, фонового экрана, фото- или видеокамеры и компьютера с программным обеспечением. Метод позволяет визуализировать оптические неоднородности – оптически прозрачные области с градиентом показателя преломления. Для визуализации оптических неоднородностей осуществляется анализ изображений фоновых экранов, которые изменяются под действием градиентов показателя преломления в исследуемой области. Метод не требует использования оптических элементов, сравнимых по размерам с объектом регистрации. Это свойство делает его удобным для полигонного применения.

ТФМ нашел широкое применение в различных областях научных исследований, так в обзорной статье [2] говорится о более ста работах, посвящённых данной тематике и опубликованных в период с 2000 по 2015 год. В России первые работы с использованием ТФМ были проведены в МЭИ (на кафедре физики им. В.А. Фабриканта в институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова) [3, 4], где и по настоящее время ведутся работы по данному направлению [5 – 8]. Работы по применению ТФМ ведутся также на кафедре молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [9 – 11], в лаборатории когерентной оптики оптического отдела им. Г.С. Ландсберга Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) [12] и в ЦАГИ [13].

Основной объем опубликованных материалов по вопросу применения ТФМ посвящён его использованию в лабораторных исследованиях для регистрации относительно небольших по размеру объектов. В меньшей степени, что особенно актуально для отечественных материалов, освещена задача применения ТФМ для панорамной визуализации крупномасштабных объектов в полигонных условиях.

В данном пособии обобщены материалы и практические знания авторов по вопросу применения ТФМ для визуализации оптических неоднородностей в полигонных условиях.

Теоретические сведения

1.1. Схема регистрации

ТФМ относится к рефракционным методам визуализации оптических неоднородностей. Возможность применения данных методов для визуализации оптических неоднородностей основана на зависимости показателя преломления исследуемой среды от ее плотности и как следствие от давления и температуры. Для неионизированных газов с большой точностью выполняется соотношение Гладстона-Дейла:

$$n = 1 + G\rho, \quad (1.1)$$

где n – показатель преломления;

G – постоянный для данного газа и данной длины волны коэффициент (постоянная Гладстона-Дейла);

ρ – плотность.

На рисунке 1.1 приведена схема, поясняющая принцип рефракционных методов визуализации. Показатель преломления n в оптической неоднородности (2) является функцией трех координат (x , y , z). Луч света (1), движущийся вдоль оси OZ , пройдя через оптическую неоднородность, отклонится на угол α и пересечет плоскость экрана (3) в точке B' , в то время как не отклоненный луч пришел бы в точку A' .

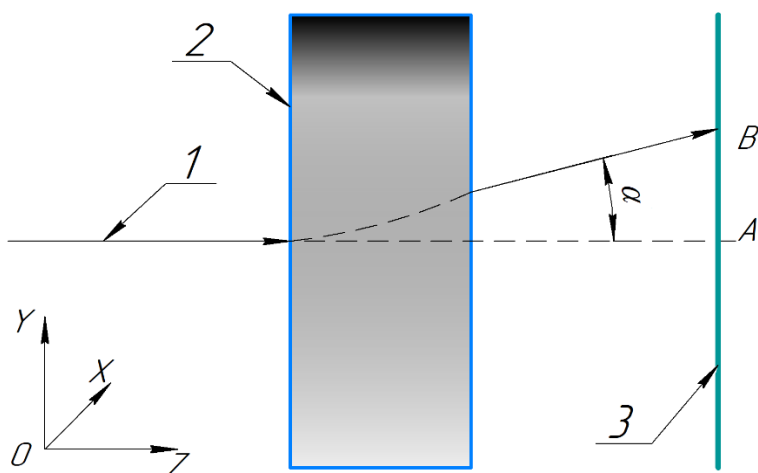


Рис. 1.1. Отклонение световых лучей в оптической неоднородности

В соответствии с законами рефракции отклонение луча при прохождении оптической неоднородности описывается соотношениями:

$$\alpha_x = \frac{1}{n_0} \int_0^s \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz, \quad (1.2)$$

$$\alpha_y = \frac{1}{n_0} \int_0^s \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} dz, \quad (1.3)$$

где n_0 – коэффициент показателя преломления невозмущенной окружающей среды.

В плоскости экрана можно измерить следующие величины: смещение луча QQ' ; угол отклонения луча в оптической неоднородности, разность фаз двух лучей, определяемую их оптической разностью хода.

Оптические методы визуализации основаны на регистрации одной из этих величин или их комбинаций. ТФМ основан на регистрации смещений лучей света в плоскости регистрации вызванных их отклонением при прохождении оптической неоднородности.

Схема типичной установки для ТФМ представлена на рисунке 1.2, где видеокамера (4) регистрирует фоновый экран (1), который освещается с помощью источника света (2) при отсутствии и наличии оптической неоднородности (3); на персональном компьютере (5) проводится обработка полученной информации.

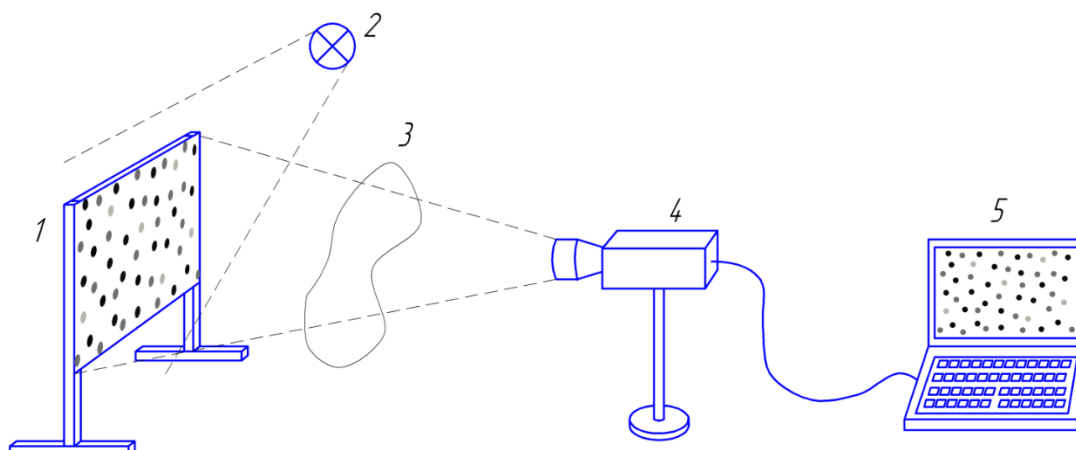


Рис. 1.2. Пример реализации ТФМ

После получения экспериментальных изображений осуществляется их обработка. Обработка заключается в анализе изменений, произошедших в изображении фонового экрана относительно его реперного изображения. Пример влияния крупномасштабной оптической неоднородности на результирующее изображение экрана представлен на рисунке 1.3, где представлено изображения экрана без оптической неоднородности в кадре (а) и при ее наличии (б).

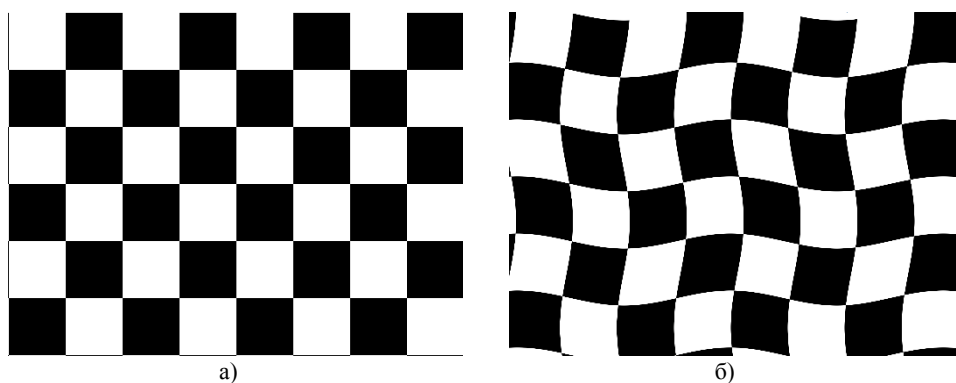


Рис. 1.3. Пример влияния оптической неоднородности на изображение экрана

Для анализа зарегистрированных изображений в методе ТФМ наибольшее распространение получили подходы на основе кросскорреляционного анализа [14] и операции вычитания по модулю [15]. Кросскорреляционный способ, отработанный в рамках метода цифровой трассерной визуализации (PIV – Particle Image Velocimetry), хорошо себя зарекомендовал при использовании специальных («шумоподобных») контрастных экранов. При использовании в качестве экранов природных фонов оптимально применять вычитание по модулю для получения качественной картины визуализации границ оптической неоднородности.

Для эффективного использования ТФМ в области визуализации оптических неоднородностей, необходима адаптация схемы регистрации под условия проведения эксперимента с целью обеспечения требуемой чувствительности и разрешающей способности.

1.2. Чувствительность схемы регистрации

Схема ТФМ позволяет определить интегральное отклонение луча прошедшего через оптическую неоднородность. Чувствительность схемы регистрации определяется возможностью зарегистрировать минимальное отклонение луча при прохождении им оптической неоднородности. На рисунке 1.4 приведена схема, иллюстрирующая принцип работы ТФМ с точки зрения геометрической оптики. Она состоит из фонового экрана (1), регистрируемой оптической неоднородности (2), оптического регистратора (3), включающего в свой состав оптическую систему (4) и приемную матрицу (5). При регистрации опорного изображения фонового экрана, когда оптическая неоднородность отсутствует в зоне регистрации, точка A , расположенная в плоскости фонового экрана, отобразится в точке A' приемной матрицы. Наличие оптической неоднородности отклонит луч на угол α , таким образом, точка A отобразится в точке B' приемной матрицы. На зарегистрированном изображении будет наблюдаться смещение точки A' относительно опорного изображения на величину $\Delta = l'_B - l'_A$. Необходимым условием наблюдения данного смещения является то, чтобы абсолютное значение величины Δ было не менее линейного размера пиксела приемной матрицы.

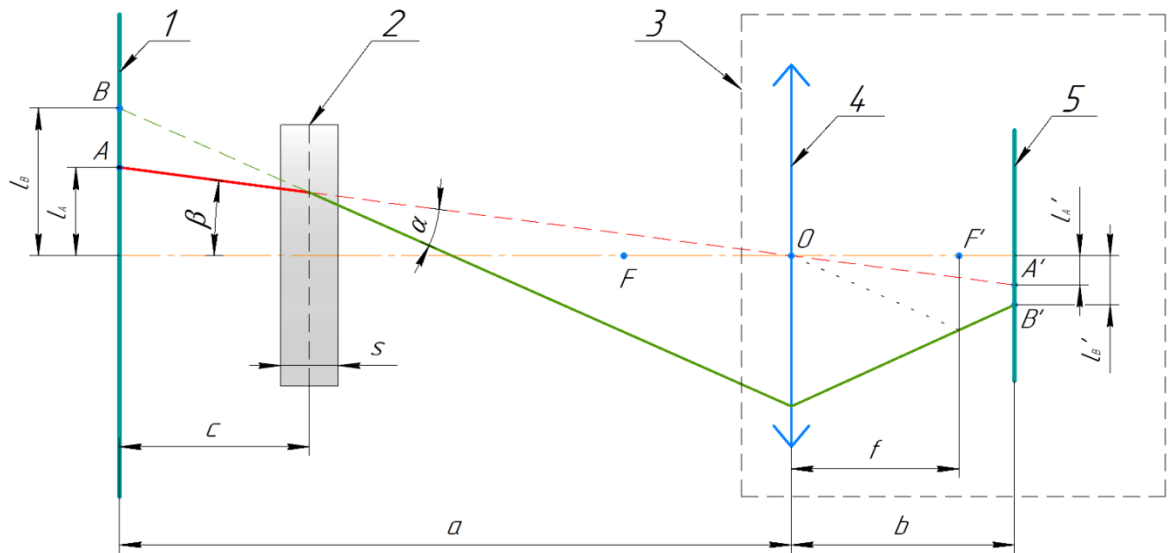


Рис. 1.4. Оптическая схема ТФМ

Чувствительность схемы ТФМ определяется как отношение зарегистрированного смещения Δ к соответствующему значению угла α отклонения луча при прохождении оптической неоднородности:

$$S = \frac{\Delta}{\alpha}. \quad (1.4)$$

В соответствии с оптической схемой ТФМ, смещение луча Δ в плоскости изображения (расстояние между точками A' и B') определяется выражением:

$$\Delta = G(l'_B - l'_A), \quad (1.5)$$

где $G = b/a$ – масштабный коэффициент схемы регистрации.

В случае параксиального приближения, т.е. при малых значениях углов α и β , расстояние от главной оси до точки B в плоскости фонового экрана может быть выражено следующим способом:

$$l_B = h + c(\alpha + \beta) = l_A - c\beta + c(\alpha + \beta) = l_A + c\alpha. \quad (1.6)$$

Таким образом, соотношение (1.5) переписывается в виде (1.7), а чувствительность схемы ТФМ, с учетом выполняемого соотношения тонкой линзы (1.8) для схемы ТФМ, может быть определена по формуле (9).

$$\Delta = Gc\alpha, \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (1.8)$$

$$S = Gc = \frac{f}{a-f} c. \quad (1.9)$$

Увеличение расстояния между фоновым экраном и оптической неоднородностью в схеме ТФМ приводит к увеличению чувствительности, но вместе с тем происходит уменьшение зоны регистрации в плоскости локализации оптической неоднородности. Кроме того, изменение параметров схемы регистрации влияет на ее разрешающую способность, что следует учитывать.

1.3. Оптическое пространственное разрешение

Основным элементом схемы ТФМ является оптический цифровой регистратор (видеокамера, фотоаппарат). Именно развитие цифровой техники позволило реализовать ТФМ. В цифровом оптическом регистраторе в качестве чувствительного элемента используются приемная матрица сенсоров, которая, в свою очередь, определяет разрешающую способность схемы регистрации в плоскости формирования изображения. Рисунок 1.5 иллюстрирует главный способ использования матриц сенсоров.

Энергия, излучаемая источником освещения (а), отражается от объекта сцены (б). Система формирования изображения (в) собирает поступающую энергию и фокусирует ее на плоскости изображения (г). Совмещенная с этой плоскостью приемная матрица генерирует набор выходных сигналов, каждый из которых пропорционален интегралу световой энергии, принятой соответствующим сенсором. Результатом данного процесса является цифровое изображение, схематически показанное на рисунке 5(д). Цифровое изображение состоит из конечного числа элементов, каждый из которых расположен в определенном месте и принимает определенное значение. Эти элементы называются элементами изображения, или пикселями (англ. *pixel*, *pel*). Физический размер пикселя d_{pixel} определяет разрешающую способность схемы ТФМ в плоскости формирования изображения.

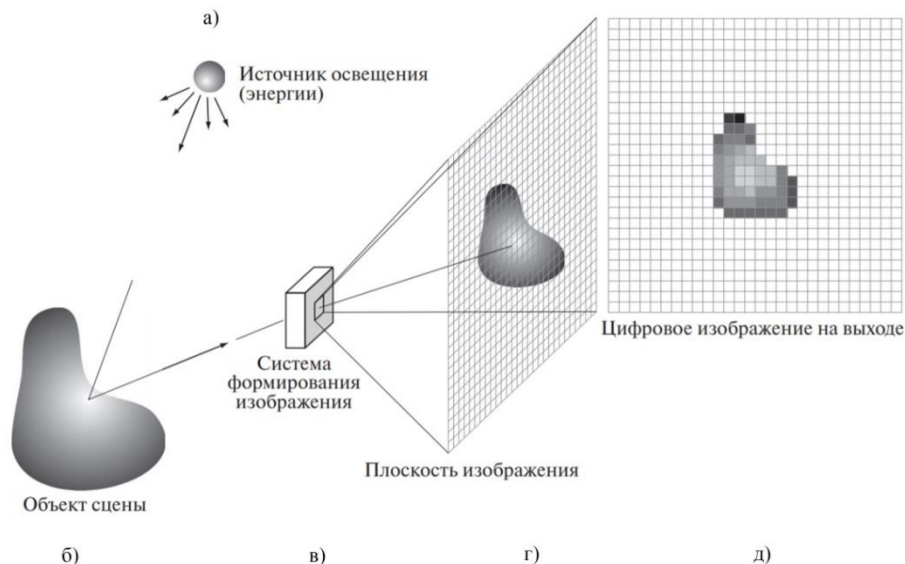


Рис. 1.5. Процесс регистрации цифрового изображения

Схема ТФМ предполагает получение контрастных изображений фонового экрана, находящегося на некотором расстоянии от оптической неоднородности. Данная особенность схемы регистрации не позволяет получить одновременно резкого изображения фонового экрана и регистрируемой оптической неоднородности. Применение апертурной диафрагмы, а именно уменьшение ее диаметра, позволяет повысить глубину резкости. На рисунке 1.6 приведена схема, поясняющая влияние диафрагмы на результат регистрации. Она состоит из фонового экрана (1), плоскости расположения оптической неоднородности (2), оптического регистратора (3), включающего в свой состав оптическую систему (4) и приемную матрицу (5).

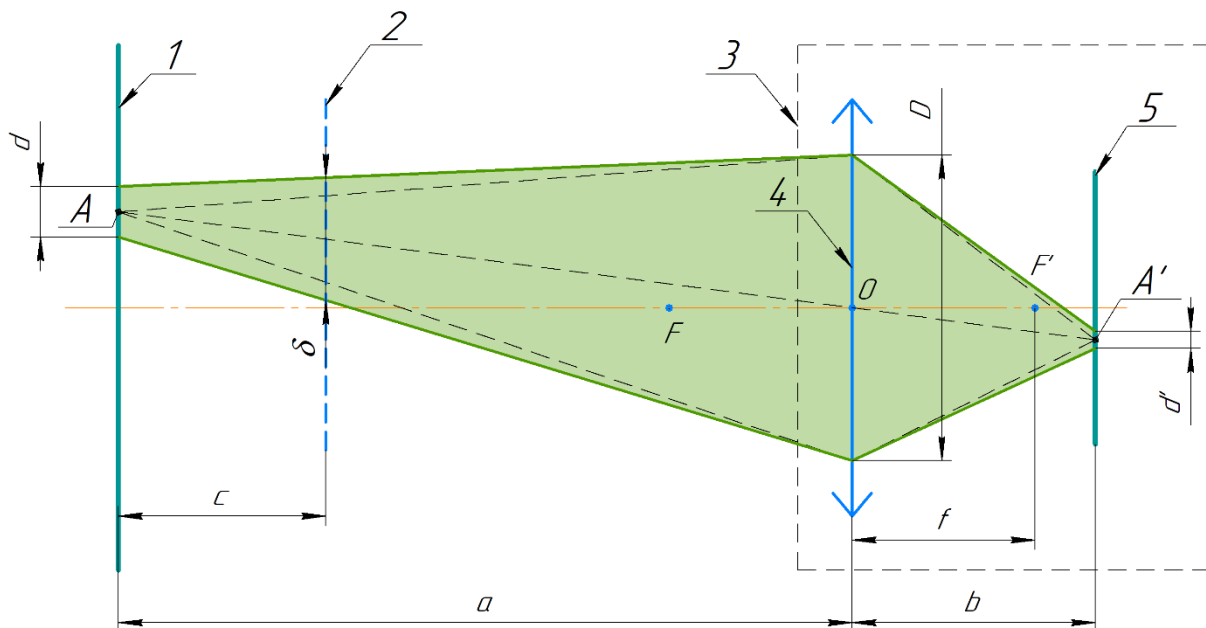


Рис. 1.6. Ход пучка лучей в схеме ТФМ

Оптическая система в своем составе содержит апертурную диафрагму с диаметром входного отверстия D . Пучок лучей из точки A , расположенной на фоновом экране, ограничивается апертурной диафрагмой и фокусируется в точке A' . Таким образом, яркость изображения, в частности, в точке A' , зависит от фактического значения D . Оптической мерой светопропускания объектива является относительное отверстие объектива, определяемое выражением:

$$N = \frac{D}{f} = \frac{1}{K}, \quad (1.10)$$

где N – геометрическое относительное отверстие объектива, K – диафрагменное число («диафрагма»).

Международным соглашением установлена последовательность значений диафрагм: 1,4 – 2 – 2,8 – 4 – 5,6 – 8 – 11 – 16 – 22 – 32. Эти числа подобраны таким образом, что при переходе к следующему значению площадь отверстия диафрагмы уменьшается в два раза.

В случае реальной оптической системы необходимо учитывать дифракцию Фраунгофера на круглом отверстии [16]. Таким образом, в плоскости изображения вместо точки A' будет наблюдаться дифракционная картина – кольца Эйри. Размер первого кольца (кружка рассеяния) определяется из условия:

$$d_{dif} = 2,44 \frac{\lambda}{D} b \approx 2,44 \lambda K, \quad (1.11)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения.

От каждой точки фонового экрана оптический регистратор фиксирует определенный конус лучей, ограниченный апертурной диафрагмой. В случае применения цифрового оптического регистратора с размером пикселя d_{pixel} и наличием кружка рассеяния в плоскости изображения d_{dif} данный конус преобразуется в усеченный конус с диаметром верхнего основания d , фактическое значение которого определяется по формуле:

$$d = d'/G = \begin{cases} d_{pixel}/G & \text{при } d_{pixel} \geq d_{dif} \\ d_{dif}/G & \text{при } d_{pixel} < d_{dif} \end{cases}. \quad (1.12)$$

В работе [17] предложено считать мерой оптического пространственного разрешения схемы ТФМ диаметр кружка δ , образованного пересечением усеченного конуса с плоскостью объекта. Внутри кружка происходит усреднение информации о градиенте показателя преломления. Оптическое пространственное разрешение схемы ТФМ δ определяется выражением:

$$\delta = \frac{c}{a}D + \frac{a-c}{a}d. \quad (1.13)$$

РАЗДЕЛ 2

Алгоритмы обработки изображений

2.1. Кросскорреляционный алгоритм

На начальном этапе развития методов цифровой обработки изображений в технике PIV для определения смещений частиц широко использовался базовый кросскорреляционный алгоритм, который в дальнейшем был назван стандартным. В дальнейшем данный подход получил широкое распространение в ТФМ. Схема обработки картин метода корреляции фоновых изображений представлена на рисунке 2.1.

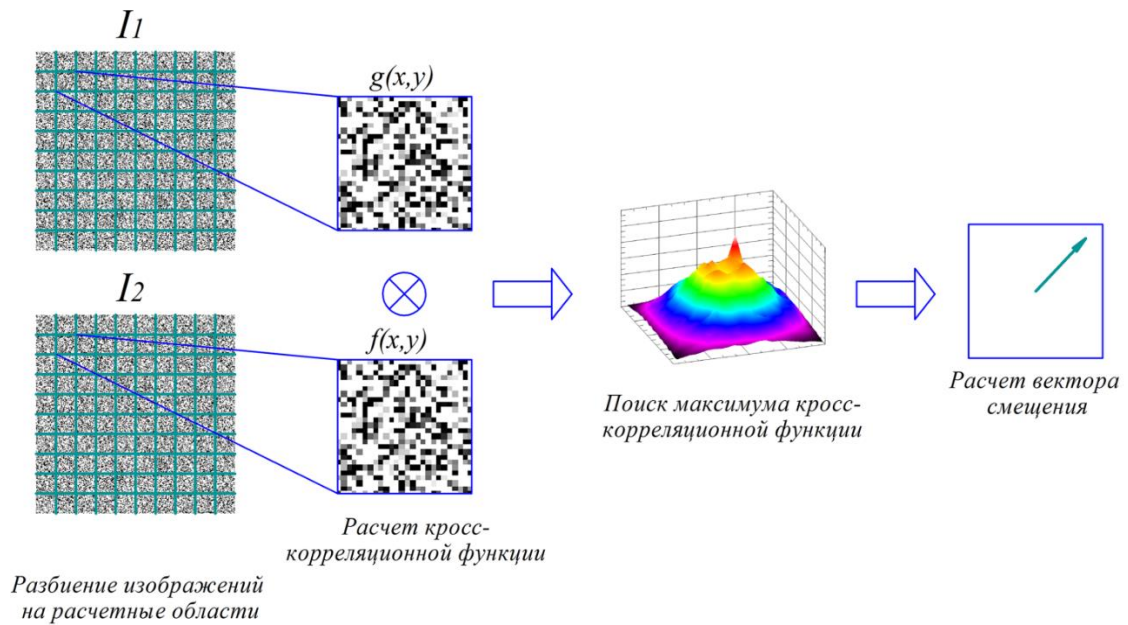


Рис. 2.1. Кросскорреляционный алгоритм

Каждое изображение делится на расчетные области в соответствии с выбранным шагом, в общем случае прямоугольные, так называемые окна опроса. Причем окна опроса могут перекрываться, если шаг разбиения меньше, чем размер окна опроса. Далее для двух соответствующих окон опроса происходит расчет функции корреляции, которую, с учетом дискретности цифровых изображений, можно выразить следующим образом:

$$R(m,n) = g \otimes f = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N g(i,j) f(i+m, j+n), \quad (2.1)$$

где g и f – двумерные функции распределения яркости на изображениях в пределах области опроса; $\otimes$ – операция свертки; M, N – размер изображения размер изображения по вертикали и горизонтали.

Следующий этап кросскорреляционной обработки заключается в нахождении максимума рассчитанной функции. Максимум корреляционной функции соответствует наиболее вероятному смещению элементов изображения. При этом в идеальном случае предполагается, что все элементы изображения внутри области опроса имеют одинаковое смещение, т.е. у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне шума. Для увеличения чувствительности при нахождении максимума применяют интерполяцию функции корреляции по нескольким точкам, которые соответствуют области нахождения максимума. Наиболее часто используют трехточечную интерполяцию с помощью функции Гаусса. Такой метод дает возможность нахождения максимума корреляционной функции с точностью до десятых или сотых долей пикселя, то есть с субпиксельной точностью.

Для расчета корреляционной функции, как правило, используется стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье с применением корреляционной теоремы Винера – Хинчина [19], в соответствии с которой:

$$R(m,n) = \mathfrak{F}^{-1} \left[\mathfrak{F}[f] \cdot \mathfrak{F}^*[g] \right], \quad (2.2)$$

где $\mathfrak{F}$ и $\mathfrak{F}^{-1}$ – прямое и обратное преобразование Фурье соответственно.

В алгоритмах быстрого Фурье преобразования размер области опроса равен $2^n \times 2^n$, где $n = 2 \div 8$. Минимальное количество пикселей для уверенной статистической обработки с точностью 1% должно быть не менее 100 [19]. При возможности для увеличения точности статистической обработки размер окна увеличивают до 32×32 или даже до 64×64 .

2.2. Вычисление разности между кадрами

Специфика применения ТФМ в задачах регистрации быстропротекающих процессов накладывает определенные ограничения на применение кросскорреляционного алгоритма для обработки зарегистрированных зависимостей. В частности, средства регистрации, применяемые в данной области, формируют изображения с гораздо меньшим количеством пикселей относительно менее скоростных средств регистрации. Кроме того, при применении кросскорреляционного алгоритма происходит усреднение информации внутри окна опроса, что отрицательно влияет на результат визуализации.

Для качественной визуализации оптической народности ТФМ в задачах регистрации быстропротекающих процессов часто применяют обработку зарегистрированных изображений путем вычисления разности между кадрами. Таким примером является способ [15], в основе которого заложено попиксельное вычитание по модулю изображений фоновых экранов, полученных в разные моменты времени. Анализируется пара изображений, одно из которых регистрируют при отсутствии, другое - при наличии оптической неоднородности в кадре, либо двух изображений, в которых имеется смещение границ регистрируемой оптической неоднородности на величину, превышающую значение разрешения оптического регистратора.

При регистрации динамической оптической неоднородности, а также при наличии изменений яркости изображений фонового экрана (например, при использовании внешнего источника света, работающего в импульсном режиме) удобно сравнивать три последовательных кадра по формуле:

$$N_i = \left| F_{i-1} - F_i \right| \cap \left| F_{i+1} - F_i \right|, \quad (2.3)$$

где N и F - матрицы значения яркости результата визуализации и обрабатываемых изображений, соответствующие номеру кадра (i) результата видеорегистрации.

Данный способ менее требователен к структуре фоновых экранов, что позволяет использовать естественные фоны (лес, трава, песок, кирпичная стена...) для визуализации оптических неоднородностей.

Влияние параметров схемы регистрации на результат визуализации

Для положительного результата визуализации необходимо выполнение ряда критериев, относящихся к схеме ТФМ. В первую очередь, изображение фонового экрана должно быть резким и контрастным. При наличии неоднородности между камерой и фоном детали на регистрируемом изображении могут стать расфокусированными. Если опорное изображение без неоднородности было размытым, то в ее присутствии текстура фона может стать полностью неразличимой, что приведет к потере информации о смещениях элементов фонового изображения.

Размер характерных частей рисунка на экране (Δ_{el}) должен быть оптимизирован для величины смещений, наблюдаемых в исследуемой неоднородности. Так, крупная текстура экрана, состоящая, например, из значительно удаленных друг от друга черных точек на белом фоне, при регистрации мелкомасштабных смещений может существенно снизить информативность экспериментальных данных.

Структура фонового экрана не должна обладать периодичностью, так как при смещении на величину, равную периоду рисунка, может быть полностью потеряна информация о величине и направлении смещения.

Существуют также особые условия, связанные с размером единичного контрастного элемента фонового экрана в плоскости изображения. В цифровом изображении этой мерой является количество пикселей (N_{pixel}), приходящихся на указанный контрастный элемент фонового экрана. С одной стороны, размер деталей на изображении должен быть достаточно малым для уменьшения погрешности определения смещений с помощью цифровой обработки. С другой – слишком мелкие элементы при обработке могут привести к возникновению периодической структуры на гистограмме распределения рассчитанных смещений (так называемый эффект «reak locking») [19]. Этот нежелательный эффект связан с особенностями реализации корреляционных алгоритмов для поиска смещений элементов на цифровых изображениях.

Выбор фонового экрана для решения определенной экспериментальной задачи должен осуществляться индивидуально, с учетом рассмотренных замечаний. Фоном может служить не только синтезированное изображение, но и снимки естественных объектов. Расположение фонового экрана относительно цифровой камеры также оказывает влияние на результат эксперимента (см. разделы 1.2, 1.3).

Влияние параметров схемы регистрации на результат визуализации было исследовано экспериментально. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 7 и в таблице 1. Исследования проводились с применением тестовой оптической неоднородности – воздушной ударной волны (ВУВ), сгенерированной электрическим взрывом проволоки. В качестве источника высокого напряжения использовался накопитель (НЭ) с энергией разрядного контура 216 Дж и уровнем напряжения 12 кВ. Взрывалась медная проволока диаметром 0,09 мм и длиной 30 мм. Видеорегистрация осуществлялась с помощью видеокамеры (ВК) с частотой регистрации 2128 к/с при разрешении приемной матрицы 1920×1080 пикс. Использовалась ВК с матрицей, чувствительной в диапазоне от 290 до 1100 нм и размером пикселя 11 мкм. Время экспозиции τ и параметры объектива приведены в таблице 3.1. В качестве фонового экрана (ФЭ) использовался экран, состоящий из 15 областей, отличающихся физическим размером зерна (таблица 3.2). Каждая область представляет собой хаотичную структуру (рисунок 8) из элементов квадратной формы, распределенных нормально по всей площади. Видеорегистрация осуществлялась в условиях искусственного освещения. Применялся импульсный источник света (ИС) с амплитудной силой света 6×10^6 кд при длительности импульса 5 мс. Непосредственно перед проведением каждого эксперимента производилась настройка на резкость ВК с помощью контрольной марки (КМ), расположенной в зоне регистрации.

Для подтверждения стабильности формирования ВУВ с помощью датчика давления (ДД) измерялось максимальное избыточное давление во фронте сгенерированной ВУВ.

Зарегистрированный массив изображений был обработан с помощью кросскорреляционного алгоритма. Использовался многопроходный кросскорреляционный алгоритм обработки с квадратным окном опроса и 50 % перекрытием. Размер окна опроса итерационно уменьшался с 128 до 32 пикс. Аппроксимация корреляционной функции проводилась с помощью трехточечной

гауссовой интерполяции без предварительной обработки изображений. Обработка проводилась в программе «PIVview2CDemo». Результаты обработки приведены на рисунках 3.3 – 3.9.

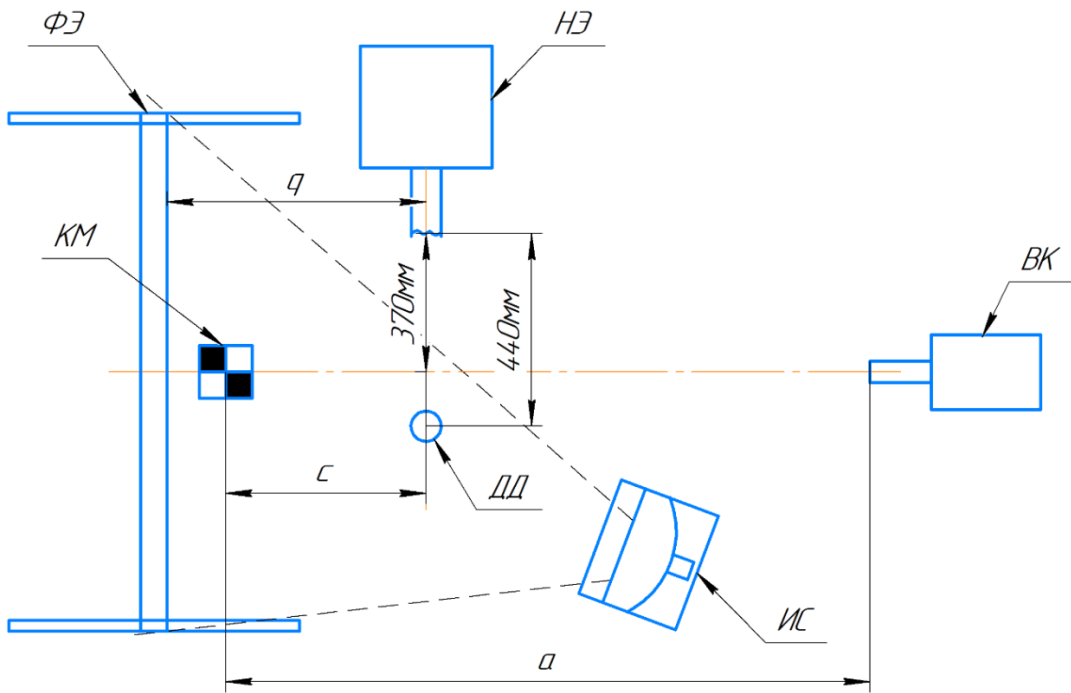
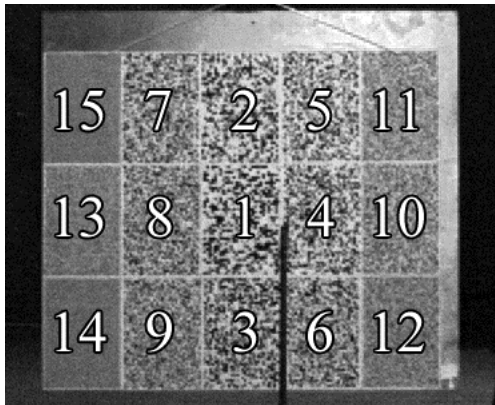


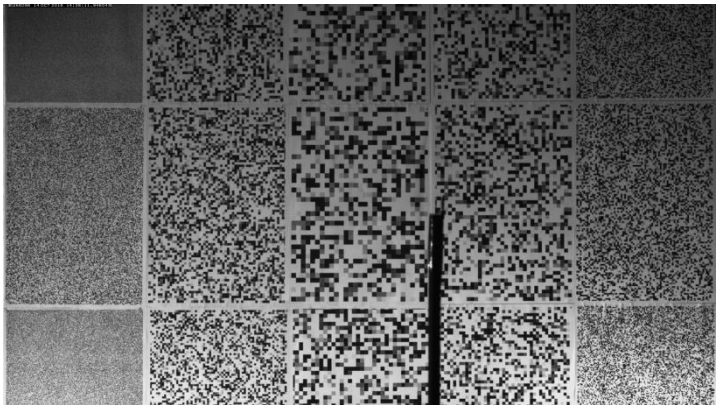
Рис. 3.1. Схема расстановки оборудования

Таблица 3.1 - Параметры схемы регистрации

Эксп. №	τ (мкс)	f (мм)	K	a (мм)	c (мм)	q (мм)	$\Delta P_{ДД}$ (кПа)	S (мм/рад)	δ (мм)
1	3	115	2,8	5710	2320	2320	5,7	47,685	17,005
2	3	115	2,8	4710	1320	2320	5,6	33,036	11,827
3	3	115	2,8	3390	0	2320	5,7	0	0,313
4	100	115	11	5710	2320	2320	5,7	47,685	5,114
5	250	115	22	5710	2320	2320	5,5	47,685	3,828
6	100	115	22	5710	2320	2320	5,6	47,685	3,828
7	3	85	2,8	4390	1000	1000	5,7	19,744	7,345
8	3	120	2,8	6390	3000	3000	5,3	57,416	20,426



а)

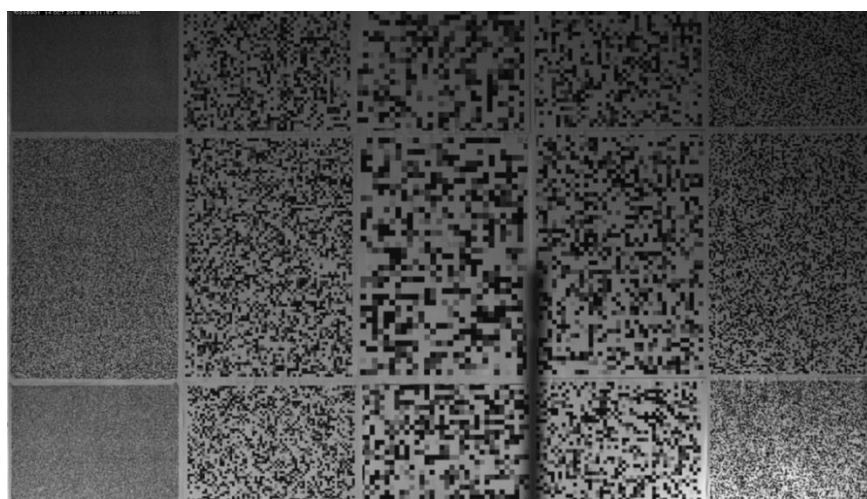


б)

Рис. 3.2. Общий вид (а) и увеличенный фрагмент (б) фонового экрана

Таблица 3.2 – Параметры фонового экрана

Область №	Δ_{el} (мм)	N_{pixel}
1	7,00	163,8
2	6,50	141,3
3	6,00	120,4
4	5,50	101,1
5	5,00	83,6
6	4,50	67,7
7	4,00	53,5
8	3,50	41,0
9	3,00	30,1
10	2,50	20,9
11	2,00	13,4
12	1,50	7,5
13	1,00	3,3
14	0,50	0,8
15	0,25	0,2



а)

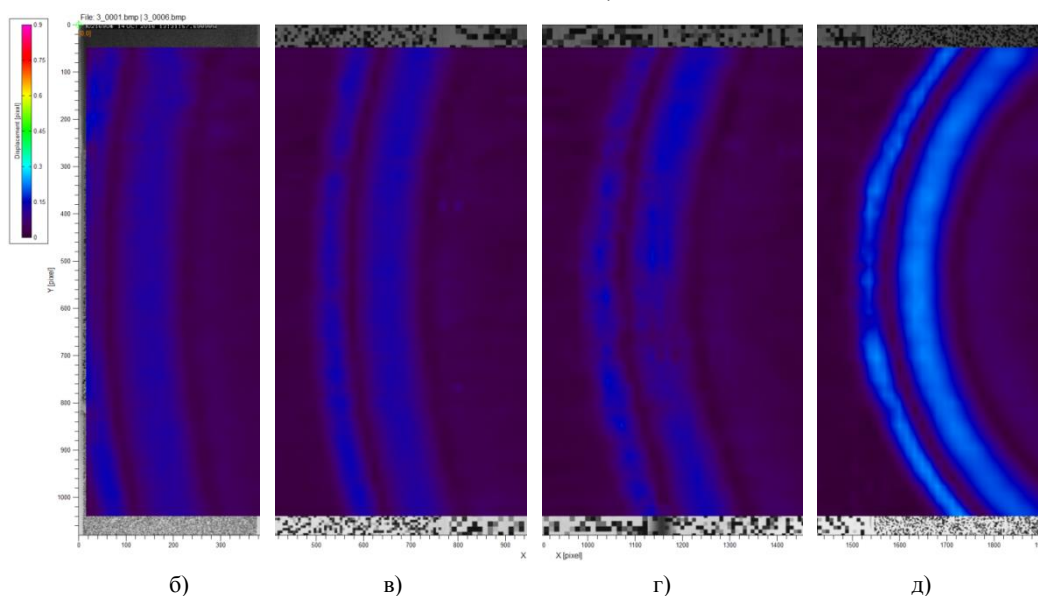
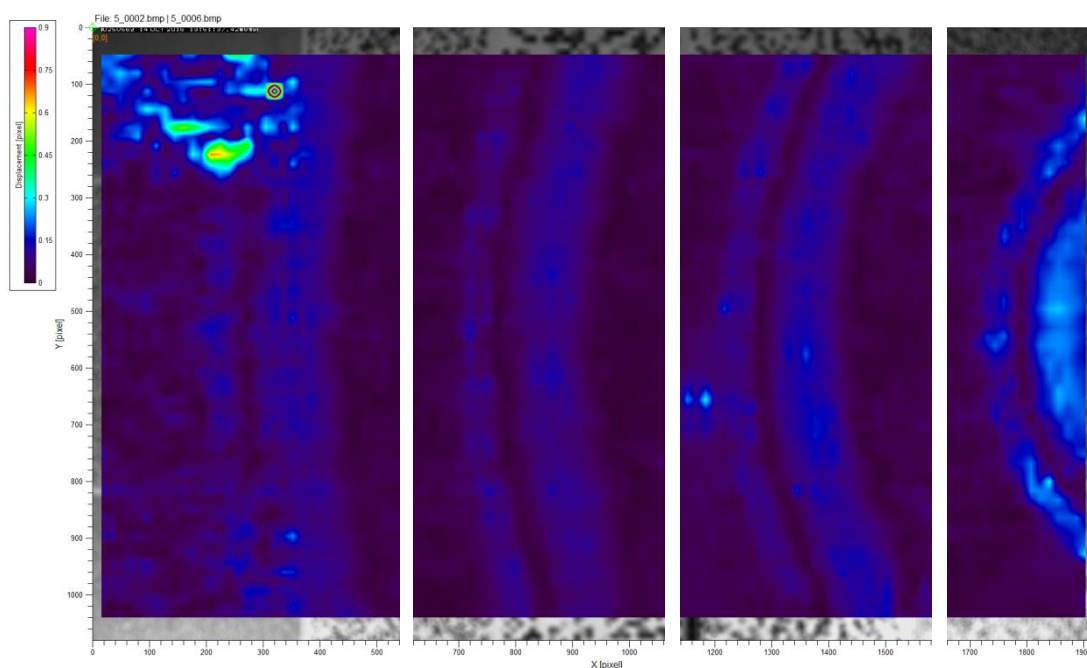


Рис. 3.3. Статический кадр фонового экрана (а) и фрагменты результатов обработки (б – д), полученные в эксперименте № 1



а)



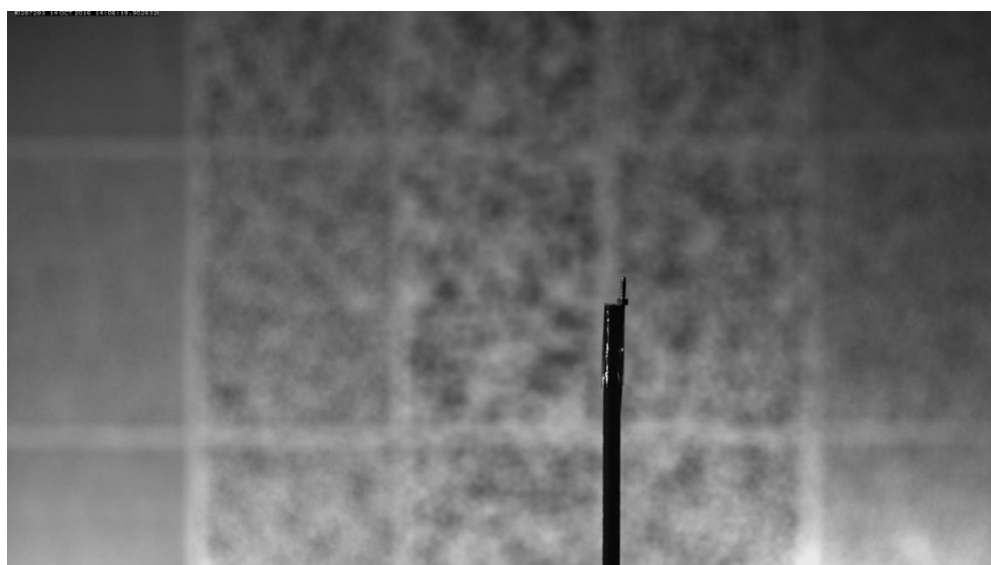
б)

в)

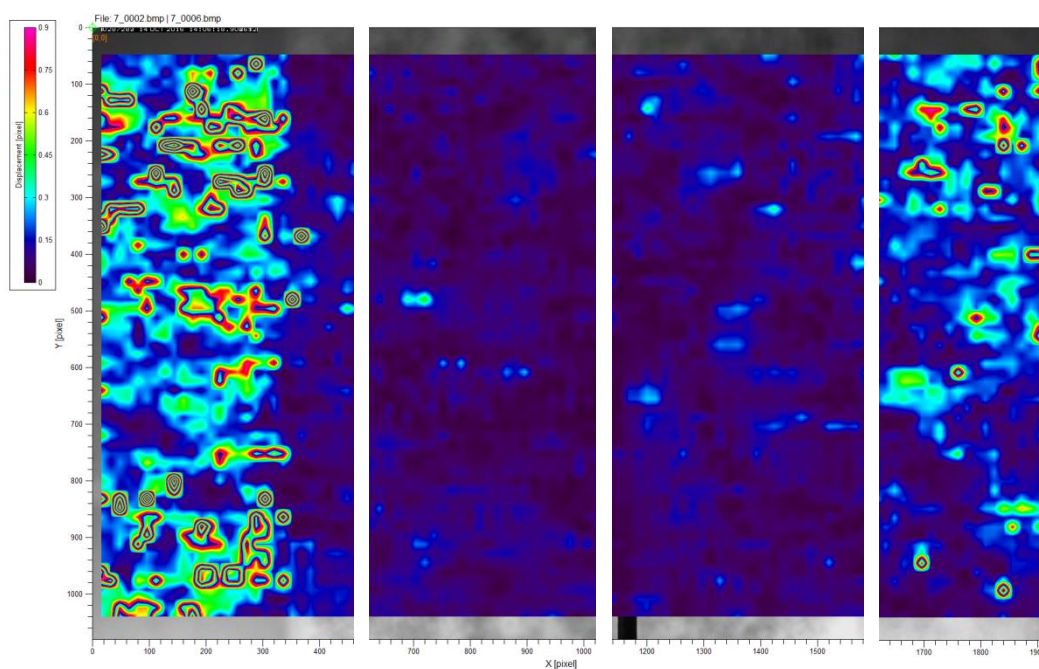
г)

д)

Рис. 3.4. Статический кадр фонового экрана (а) и фрагменты результатов обработки (б – д), полученные в эксперименте № 2



а)



б)

в)

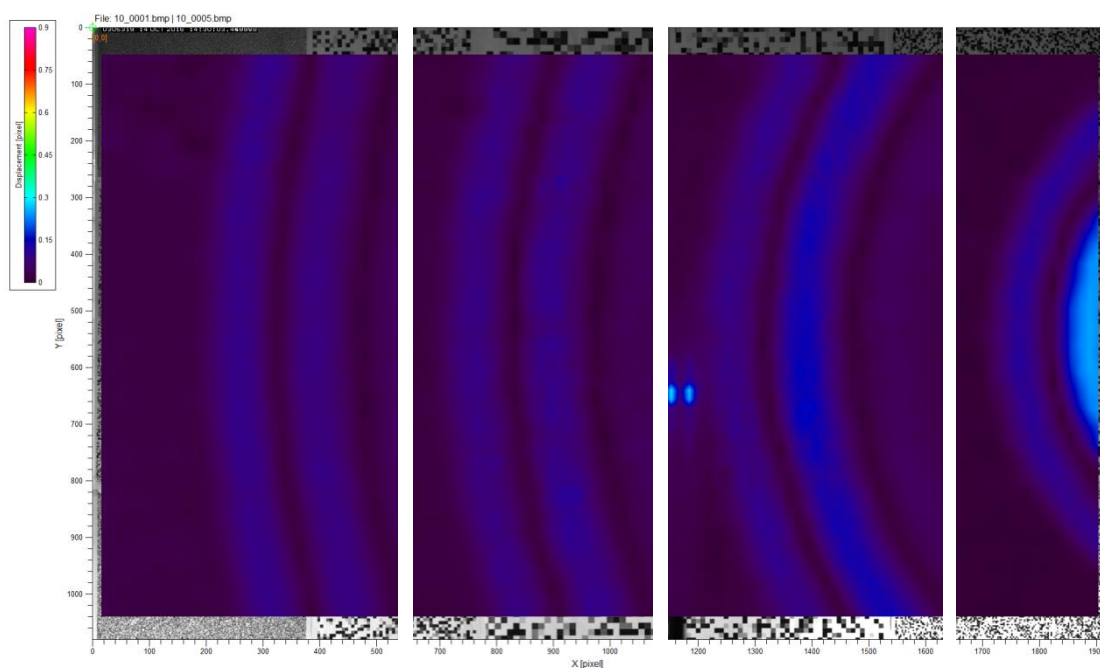
г)

д)

Рис.3.5. Статический кадр фонового экрана (а) и фрагменты результатов обработки (б – д), полученные в эксперименте № 3



а)



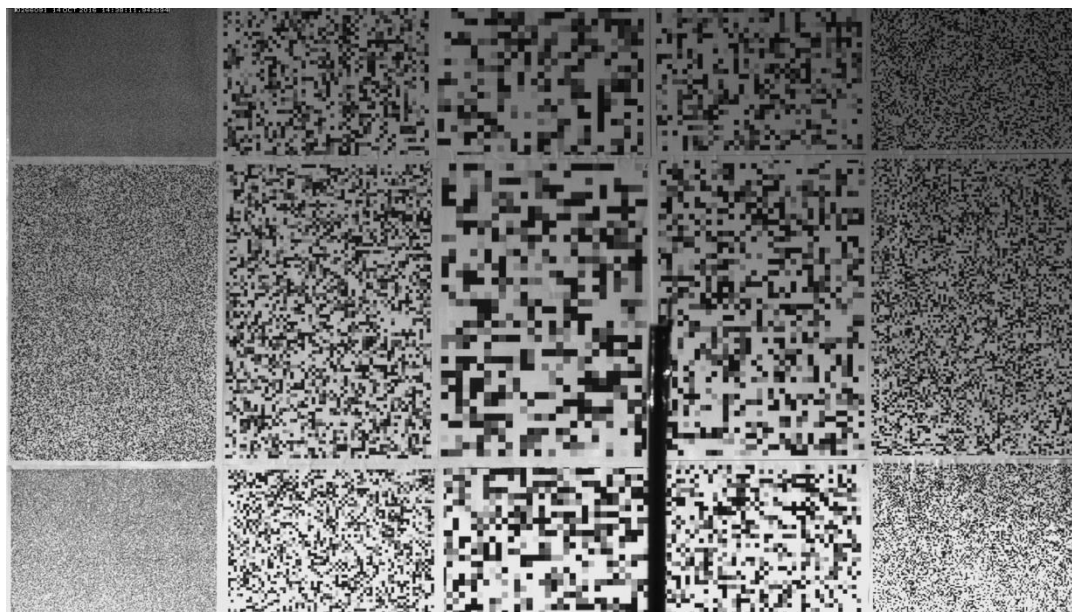
б)

в)

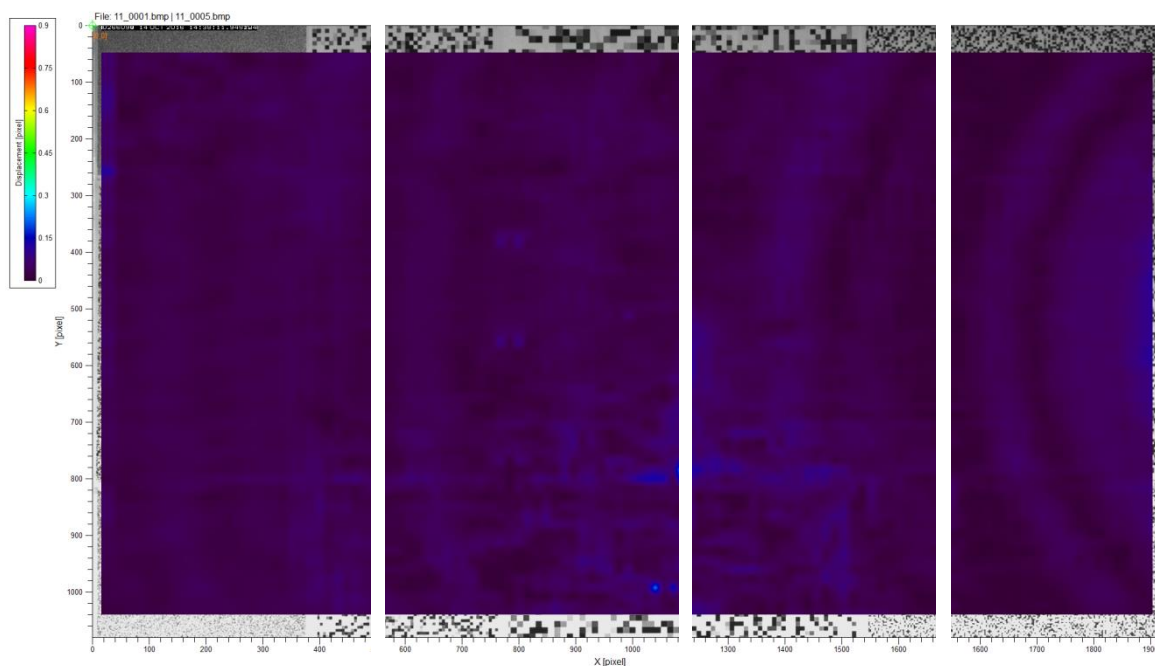
г)

д)

Рис.3.6. Статический кадр фонового экрана (а) и фрагменты результатов обработки (б – д), полученные в эксперименте № 4



а)



б)

в)

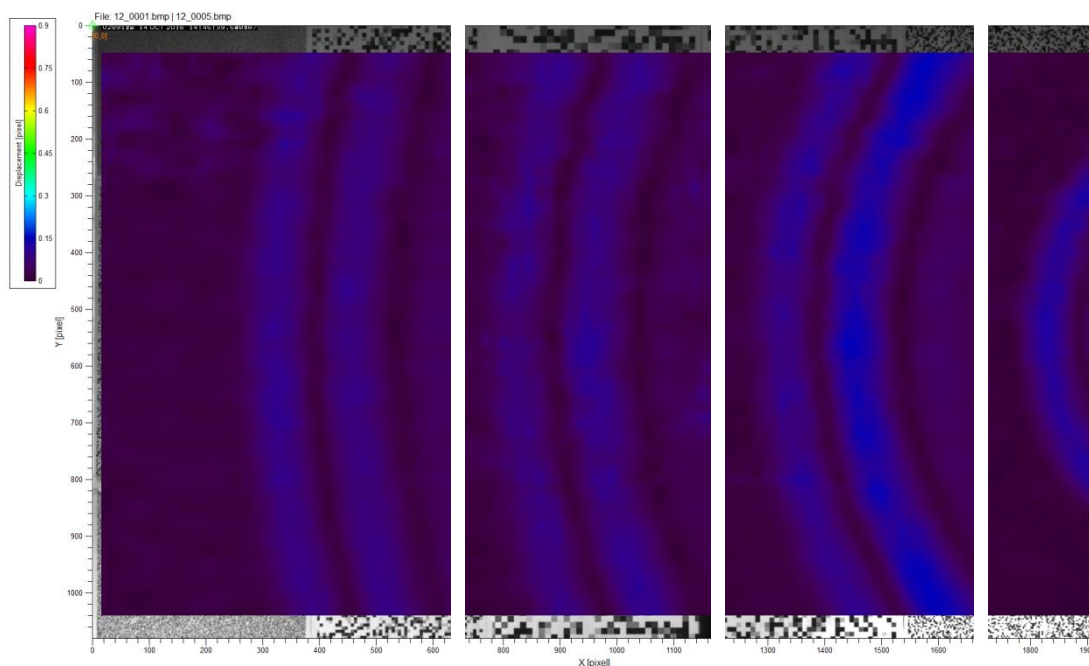
г)

д)

Рис.3.7. Статический кадр фонового экрана (а) и фрагменты результатов обработки (б – д), полученные в эксперименте № 5



а)



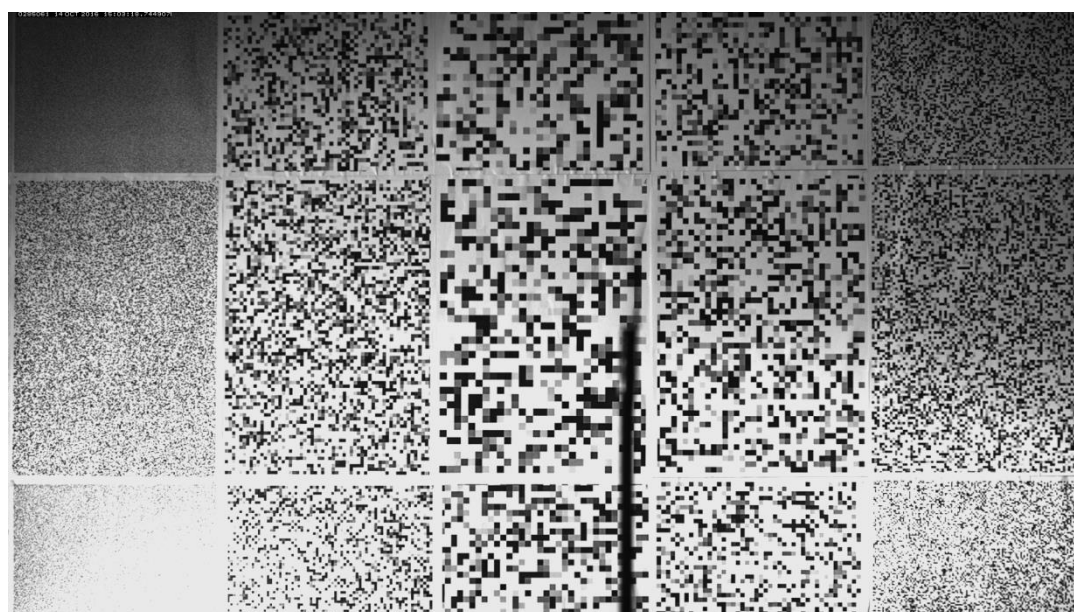
б)

в)

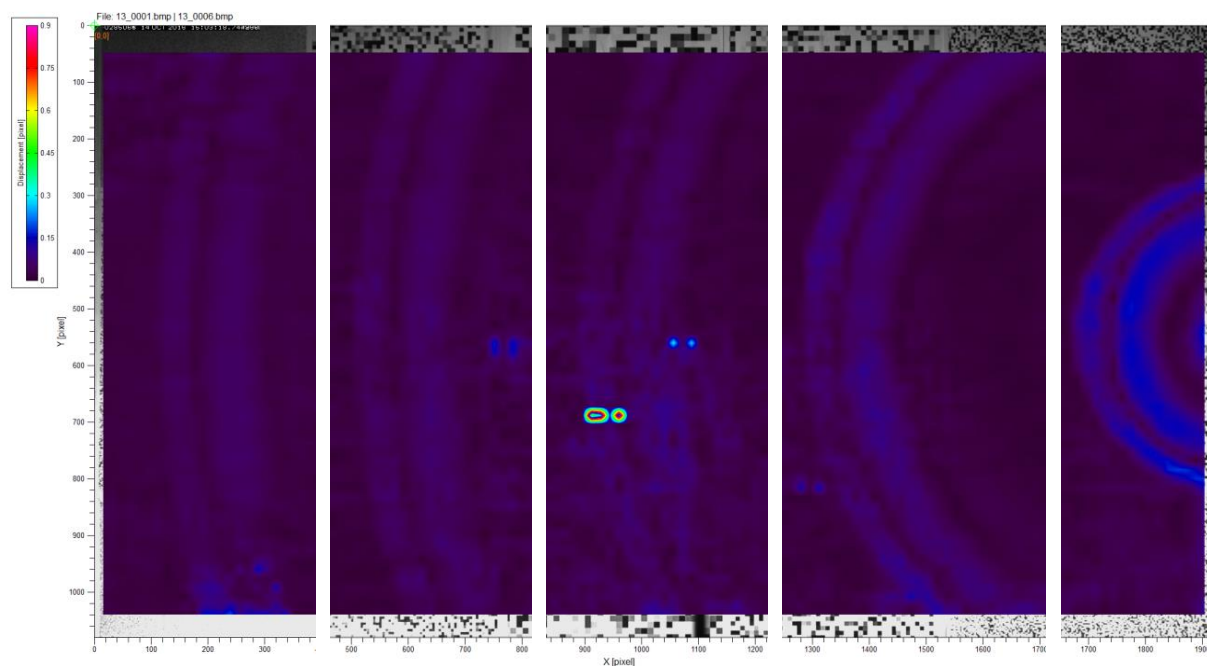
г)

д)

Рис.3.8. Статический кадр фонового экрана (а) и фрагменты результатов обработки (б – д), полученные в эксперименте № 6



а)



б)

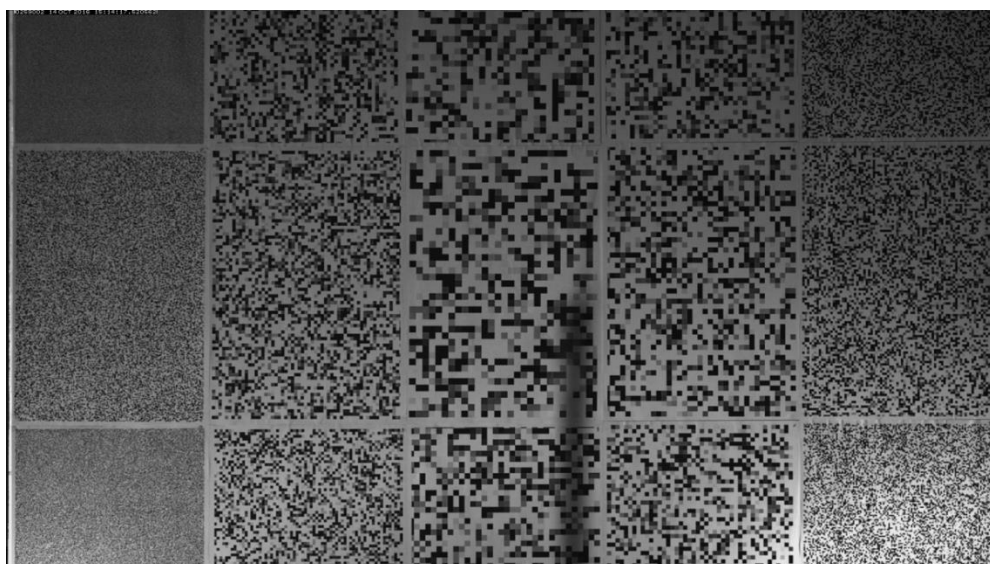
в)

г)

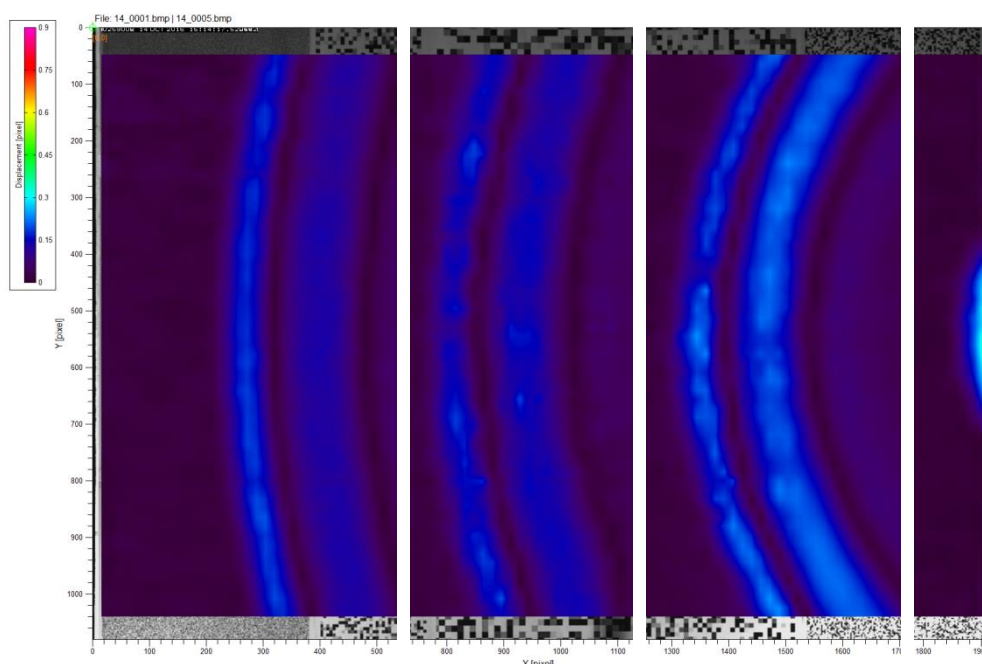
д)

е)

Рис. 3.9. Статический кадр фонового экрана (а) и фрагменты результатов обработки (б – е), полученные в эксперименте № 7



а)



б)

в)

г)

д)

Рис. 3.10. Статический кадр фонового экрана (а) и фрагменты результатов обработки (б – д), полученные в эксперименте № 8

Анализ полученных данных показывает, что на качество визуализации влияет ряд параметров, относящихся к схеме оптической регистрации. Время экспонирования кадра влияет на «смаз» регистрируемой динамической оптической неоднородности. Его увеличение влечет за собой увеличение ширины визуализируемой области с потерей качества результирующей картины (см. рисунки 3.3, 3.6, 3.7). Увеличение оптического пространственного разрешения δ схемы ТФМ повышает качество картин визуализации (см. рисунки 3.3, 3.7). Влияние чувствительности схемы регистрации S на результат визуализации наглядно демонстрируют результаты, приведенные на рисунках 3.9, 3.3, 3.10. Глубина резкости и фокусировка должны обеспечивать получение резкого изображения фонового экрана. Уменьшение его резкости (рисунки 3.3 – 3.5) способствует ухудшению визуализации оптической неоднородности вплоть до полной потери информации об исследуемой области (рисунок 3.5). Немаловажным является количество пикселей приемной матрицы видеокамеры, приходящихся на один элемент фонового экрана (N_{pixel}). Полученные данные коррелируются с информацией, представленной в работе [20]. Хорошие результаты показали элементы экранов под номерами 3.5 – 3.7, что соответствует целому значению N_{pixel} от 4 до 16 (для пикселя квадратной формы).

Список источников

1. Hintergrund-Schlierenmeßverfahren für räumliche Dichtefelder: pat. 19942856 DE: Int Cl. G01N 21/49, G01B 11/00 / Meier Gerd E.A. - № 19942856.5; anmeldetag 08.09.1999; offenlegungstag 21.06.2000.
2. Raffel, M. Background-oriented schlieren (BOS) techniques / M. Raffel // *Experiments in Fluids*. - 2015. - Vol.56. - № 3. - P. 1-17.
3. Popova, E.M. Processing schlieren-background patterns by constructing the direction field / E.M. Popova // *Journal of optical technology*. - 2004. - Vol.71. - № 9. - P. 572-574.
4. Popova, E.V. Application of background-oriented schlieren method to the visualization inhomogenities of liquid during exposure to laser radiation / E.V. Popova, N.M. Skornyakova, A.V. Tolkachev // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. - 2004. - P. 151-161.
5. Попова, Е.М. Теневой фоновый метод в задачах тепломассообмена: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 01.04.05 / Попова Екатерина Михайловна. - М.: МЭИ, 2008. - 23 с.
6. Удалов, А.В. Аппаратно-программный комплекс теневого фонового метода для натурных исследований: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.11.07 / Удалов Андрей Викторович. - М.: МЭИ, 2010. - 19 с.
7. Проиков, А.Ю. Метод корреляции фоновых изображений для анализа смещений крупномасштабных поверхностей: автореф. дис. канд. тех. наук: 01.04.05 / Проиков Антон Юрьевич. - М.: МЭИ, 2012. - 26 с.
8. Шашкова, И.А. Разработка оптико-электронного комплекса диагностики процесса испарения жидкости: дис. канд. тех. наук: 05.11.07 / Шашкова Инна Александровна. - М.: МЭИ, 2015. - 154 с.
9. Цзынь, Ц. Исследование взаимодействия ударной волны с импульсным объемным разрядом теневыми методами: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Цзынь Цзынь. - М.: МГУ, 2012. - 28 с.
10. Плаксина, Ю.Ю. Гидродинамическая структура поверхностного слоя на границе раздела «вода-воздух»: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.29; 01.04.17 / Плаксина Юлия Юрьевна. - М.: МГУ, 2012. - 22 с.
11. Глазырин, Ф.Н. Исследование быстропротекающих процессов в течениях с ударными волнами цифровыми оптическими методами: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Глазырин Федор Николаевич. - М.: МГУ, 2016. - 128 с.
12. Миронова, Т.В. Анализ деформаций, оптических неоднородностей и дисторсионных искажений с помощью искусственных спеклов в цифровой фотографии: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 / Миронова Татьяна Вячеславовна. - М.: ФИАН, 2012. - 95 с.
13. Visualization of the aerodynamic vortices by Background Oriented Schlieren / Iinshakov S.I. [et al.] // *Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*. - 2015. - P. 1-12.
14. Adrian, R. J. Twenty years of particle image velocimetry / R. J. Adrian // *Experiments in Fluids*. - 2005. - Vol. 39. - № 2. - P. 159-169.
15. Способ визуализации оптических неоднородностей: пат. 2621620 Рос. Федерация: МПК G01N 21/45, G06T 7/20 / Герасимов С.И., Тотышев К.В., Трепалов Н.А. - № 2015144660; заявл. 16.10.15; опубл. 06.06.17, Бюл. № 16. - 8 с.
16. Бутикова, Е.А. Оптика: Учебное пособие для студентов физических вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: Невский Диалект; БХВ-Петербург, 2003. - 480 с.: ил.
17. A.B. Gojani, B. Kamishi, S. Obayashi // *J. Viz.*, Vol. 16, pp. 201 – 207, 2013.
18. Dainty, J.C. *Laser Speckle and Related* / J.C. Dainty. - 2nd ed. - Berlin: Springer Verlag, 1984. 342 p.
19. Базылев, Н.Б. Количественная визуализация течений, основанная на спекл-технологиях / Н.Б. Базылев, Н.А. Фомин. - Минск: Беларуская навука, 2016. - 392 с.