

03;05;07;12

О получении распределения температур в жидкости и твердом теле с помощью голографической интерферометрии

© В.В. Батькович, О.Н. Буденкова, В.Б. Константинов, О.Л. Садов, Е.А. Смирнова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 27 февраля 1998 г.)

Показано применение голографической интерферометрии к решению двух задач: нагревание стеклянной пластины сложным источником тепла и неизотермическое обтекание клина затопленной струей. Автоматизирован процесс выделения скелетных линий на интерферограммах, их нумерация и непосредственный расчет полей температур.

Введение

Рассматриваются два процесса. Первый — обтекание клина затопленной струей с температурой воды в струе отличной от температуры воды, заполняющей объем и меняющейся со временем, второй — распространение тепла в стеклянной пластине при ее нагреве сложным источником тепла. При численном или аналитическом решении поставленных задач возникают трудности, связанные со сложными граничными условиями. Так, в первом процессе из-за ограниченности объема следует учитывать отражение струи от стенок. Во второй задаче, даже зная характер тепловыделения нагревательного элемента, следует оценивать количество теплоты, попадающее в нагреваемую пластину. Внесение термпар в исследуемые объекты технически сложно и приводило бы к искажению протекания реального процесса, поэтому был применен метод голографической интерферометрии.

Получение количественных характеристик исследуемого методом голографической интерферометрии процесса связано с анализом получаемых интерференционных картин.

Распределение интенсивности на интерферограмме имеет вид [1]

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi(x, y),$$

где $I_1(x, y)$ — интенсивность волны, рассеиваемой объектом до начала процесса в точке (x, y) ; $I_2(x, y)$ — интенсивность волны, рассеиваемой объектом во время исследуемого процесса в точке (x, y) ; $\varphi(x, y)$ — разность фаз первой и второй волн в точке (x, y) .

Из-за изменения показателя преломления изучаемого объекта изменяется пространственная частота полос. Сдвиг полос также может быть обусловлен изменением длины пути луча в среде вследствие ее расширения или сжатия. По сдвигу интерференционных полос относительно их первоначального положения рассчитывается изменение распределения фаз волны, рассеиваемой объектом, связанное с интересующими характеристиками

процесса,

$$k = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{1}{\lambda} \left(\int_S n(x, y, z) dl - l_0 n_0 \right), \quad (1)$$

где k — число полос, на которое сместилась интерференционная картина; $\Delta\varphi$ — разность фаз в разные моменты времени; λ — длина волны используемого излучения; $n(x, y, z)$ — показатель преломления в точке (x, y, z) ; S — траектория луча; l_0 — длина пути луча в объекте; n_0 — показатель преломления в отсутствие исследуемой неоднородности.

Отслеживание сдвига полос может быть проведено с помощью измерения координат характерных точек каждой интерференционной полосы. Характерные точки — точки, в которых интенсивность принимает экстремальные значения, т. е. разность фаз [2]

$$\varphi(x, y) = \pi n; \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

Совокупность характерных точек одного типа, принадлежащих одной интерференционной полосе, представляет линию нулевой толщины — скелетную или остовную линию.

Выделение характерных точек на идеальной интерферограмме не представляет трудности. Однако в действительности распределение интенсивности на интерферограмме отражает наряду с полезным сигналом и присутствие различного рода шумов и может быть описано как

$$I_r(x, y) = \omega(I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \varphi(x, y)) + N(x, y),$$

где ω — функция, описывающая нелинейность отклика регистрирующей системы относительно интенсивности света; $N(x, y)$ — шум, регистрируемый вместе с сигналом (фоновый шум).

Наличие шумов в измерительной системе приводит к появлению ложных локальных экстремумов, располагающихся в точках (x, y) , где условие (2) не выполняется.

При известных статистических характеристиках шума и полезного сигнала можно построить оптимальный фильтр, результатом применения которого к исходному изображению будет сигнал, наиболее приближенный к

полезному сигналу по критерию минимума среднеквадратичной ошибки. Как правило, априорных сведений о шумах, присущих измерительной системе, нет, и попытка оценить частоты, соответствующие полезному сигналу, непосредственно по спектру изображения не приводит к успеху. Поэтому большая часть работ, связанных с автоматической обработкой интерферограмм, посвящена различным способам фильтрации изображения — модификациям уже известных фильтров и разработке новых. Наиболее полная автоматизация процесса обработки интерференционных картин существует для частных случаев [3,4].

Ниже предлагается алгоритм получения количественной информации об исследуемом процессе по интерферограммам, включающий в себя предварительную обработку исходного изображения, выделение скелетных линий и расчет сдвига интерференционных полос, на основе которого написана программа на языке Си.

Обработка интерферограмм

Исходное изображение (интерферограмма) представлено в виде числовой матрицы B размером $M \times N$. Каждый элемент матрицы может принимать значения от 0 до 255, что соответствует минимальной и максимальной интенсивностям.

Для более корректного выделения характерных точек проводилась предварительная обработка изображения фильтром скользящего среднего [5], при использовании которого значение интенсивности в рассматриваемой точке заменяется разновидностью среднего от значений соседних с ним элементов. Применение именно этого фильтра было обусловлено его простотой, а также тем, что для последующей обработки не требовалось знать истинное значение интенсивности. Многократное (3–5 раз) применение фильтра позволило избавиться от большей части ложных локальных максимумов и минимумов, присутствовавших на изображении из-за наличия шумов. Результат применения фильтра скользящего среднего записывался в новую матрицу B_1 .

Из фильтров, специально разработанных для обработки интерферограмм, применялся спиновый фильтр [6]. При использовании спинового фильтра для каждой точки изображения выбирается направление и значение интенсивности в рассматриваемой точке заменяется на некоторое среднее от значений интенсивностей в точках, соседних с ней по этому направлению. Применение спинового фильтра к интерферограммам, полученным в использовавшейся нами измерительной системе, также привело к хорошим результатам, но с более медленной сходимостью.

Выделение скелетных линий включало в себя несколько этапов. Первый — непосредственное выделение характерных точек, в которых интенсивность принимает экстремальное значение. На идеальной одномерной синусоидальной поверхности точка, в которой синус

максимален, не является экстремальной только в одном направлении. При определении максимумов и минимумов на реальной интерферограмме предполагалось, что из-за наличия шумов подобная точка может быть не экстремальной более чем в одном направлении.

Значение интенсивности $a_{i,j}$ в точке с координатами (i, j) матрицы сравнивалось со значениями интенсивностей в других точках, находящихся внутри окна размером $n \times n$ (точка (i, j) — центр окна), по четырем главным направлениям — вертикали, горизонтали и двум диагоналям окна. В случае если $a_{i,j}$ оказывалось больше значений интенсивностей во всех точках любых двух направлений, в новой матрице B_2 пикселу с координатами (i, j) присваивалось значение 255 (максимум), если меньше — 0 (минимум), в остальных случаях — 128 (фоновое значение). Эта процедура повторялась для каждой точки матрицы B_1 .

Выполненная на первом этапе фильтрация изображения не позволила полностью избавиться от ложных экстремумов, и выделенные характерные точки не образовывали сплошных линий нулевой толщины. Выделение скелетных линий из совокупности характерных точек проводилось на втором этапе. Для выделения основных линий был использован алгоритм прореживания [5], применимый только для связных областей. Промежутки, в которых связность была нарушена, заполнялись искусственно: каждому фоновому пикселу изображения присваивалось значение 0 или 255, если значения более чем двух соседних пикселей были 0 или 255 соответственно.

После процедуры прореживания оставшиеся характерные точки образовали остовные линии. Наряду со скелетными линиями, отвечающими истинным экстремумам интенсивности на интерференционной картине, на полученном изображении присутствовал шум в виде отдельных точек, коротких линий, коротких ответвлений на линиях, а также в виде разрывов линий.

Третий этап. Для удобства последующей обработки изображения определялась принадлежность каждой точки конкретной линии. Предполагалось, что точки принадлежат одной скелетной линии, если обладают одинаковым видом экстремальности (минимум или максимум) и находятся на расстоянии меньше некоторого, заданного заранее. Если точки находились на расстоянии одного пикселя и более, то промежуток заполнялся такими же экстремумами. В программе связывание точек, принадлежащих одной линии, было реализовано с помощью связанных списков. Созданная структура данных позволила упростить процедуры удаления коротких ответвлений (длина ответвления не превышает некоторой, заданной заранее) и коротких линий (длина линии не превышает некоторой, заданной заранее).

После проведения действий, описанных выше, некоторые скелетные линии остались разорванными, поэтому проводилось дополнительное связывание линий. Разрывы устранялись следующим образом: части линий связывались между собой в том случае, если прямая,

соединяющая их концы, не пересекала линий, состоящих из экстремумов другого рода. На этом процедура выделения скелетных линий завершалась. Существенным преимуществом описанной методики выделения скелетных линий является независимость от конфигурации и ориентации полос.

Для вычисления сдвига полос относительно первоначального положения они нумеровались на начальной интерференционной картине и соответствующим образом на последующих. Для работы программы, осуществлявшей нумерацию полос, необходимым условием являлось наличие хотя бы одной непрерывной полосы, проходящей через все изображение. Такой полосе присваивался нулевой номер. Полосам, расположенным справа от нее, по порядку присваивали положительные номера, слева — отрицательные, после чего значениями точек, принадлежащих скелетным линиям, становились номера соответствующих полос. Точкам, не принадлежащим скелетным линиям, присваивались дробные значения, полученные в результате интерполяции функции номеров полос по всему полю. Сдвиг каждой интерференционной полосы вычислялся простым вычитанием двух матриц, содержащих номера полос: $B_{3,0}$ (в начальный момент времени) и $B_{3,t}$ (в текущий момент времени t).

Эксперименты

По описанной выше методике был обработан ряд интерферограмм, полученных с помощью голографического интерферометра с записью на фототермопластический носитель и телевизионным снятием информации. Изображение передавалось на монитор, что позволяло наблюдать за развитием процесса в реальном времени. В интересные моменты времени с помощью фиксатора телевизионного кадра изображение вводилось в компьютер. Размер исследуемого поля 3×3 см, разрешение по полю — 512×512 пикселей.

При обработке представленных интерферограмм задавались следующие параметры: фильтр скользящего среднего применялся 3 раза; размер окна при выделении характерных точек 7×7 ; точки, находившиеся на расстоянии менее 10 пикселей, считались принадлежащими одной полосе; длина полос, подлежащих удалению, менее 11 пикселей; длина ответвлений, подлежащих удалению, менее 5 пикселей.

При решении поставленных задач предполагалось, что объект однороден вдоль направления просвечивания, формула (1) при этом переходит в

$$k = \frac{1}{\lambda} \left(n(x, y)l - n_0(x, y)l_0 \right).$$

Задача об обтекании клина затопленной струей

В начальный момент времени в кювету с клином, заполненную жидкостью, начинает втекать вода. Начальные температуры струи втекающей через сопло воды,

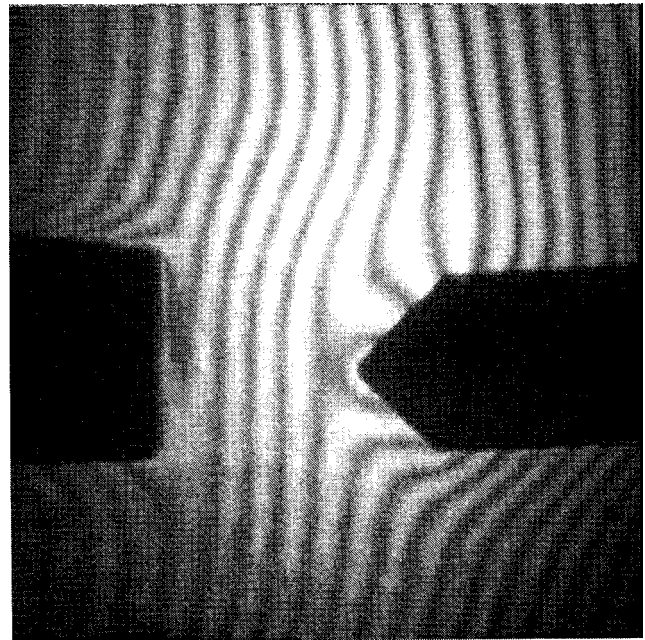


Рис. 1.

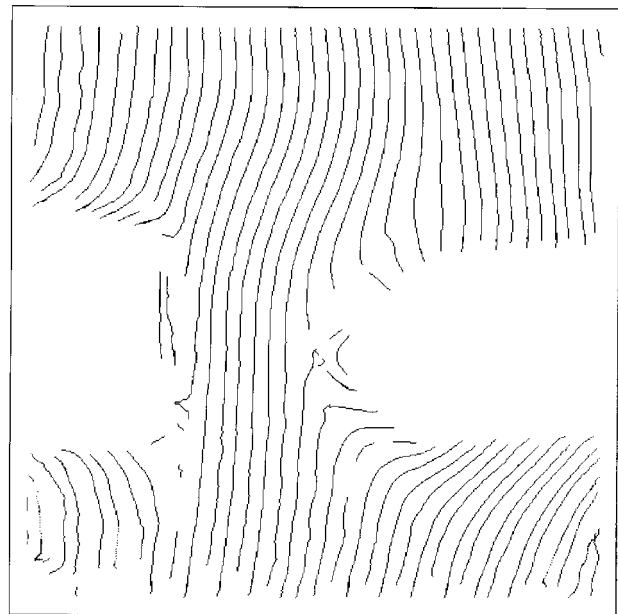


Рис. 2.

находящейся в кювете, клина и сопла имеют разные значения. Температура струи в ходе процесса понижается. Ограниченность объема ведет к значительному перемешиванию воды в кювете, на температурное поле начинают оказывать влияние отраженные от стенок потоки. Исходная интерферограмма представлена на рис. 1.

На рис. 2 показаны выделенные скелетные линии: скорость истечения струи 5 cm/s, размер кюветы $5 \times 3 \times 1.5$ см, диаметр сопла 0.4 см.

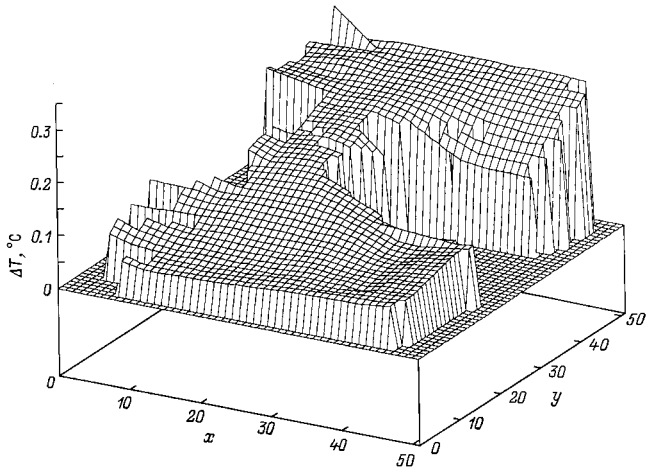


Рис. 3.

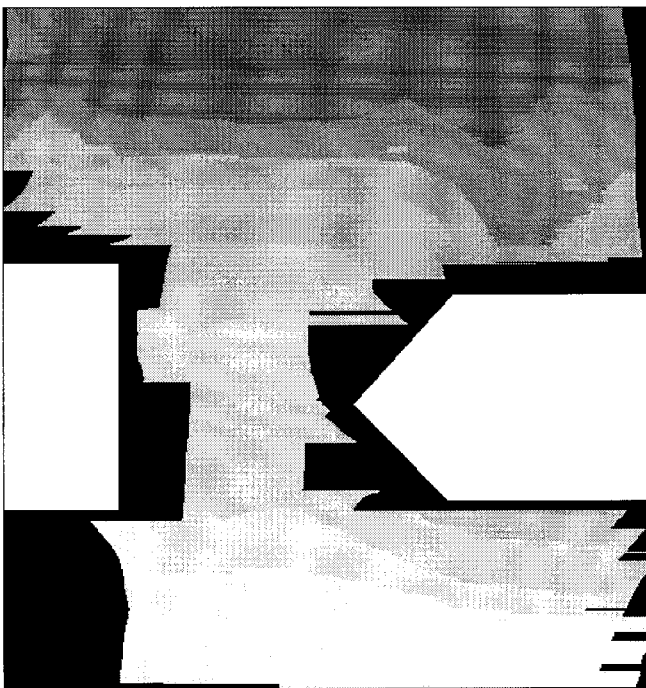


Рис. 4.

Изменение показателя преломления рассчитывалось по формуле

$$\Delta n(x, y) = \frac{\lambda k(x, y)}{l_0}. \quad (3)$$

Расчет температурного поля в объеме был проведен для момента времени, когда существенно влияние возвратных течений. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

Температурное поле в стеклянной пластине

В начальный момент времени в нагревательном элементе начинается тепловыделение, характер которого неизвестен. Выделяющееся тепло частично уходит в

окружающую среду, часть его попадает в стеклянную пластину и распространяется далее посредством теплопроводности и излучения. По проведенной оценке сдвиг полос из-за изменения показателя преломления на два порядка меньше, чем из-за расширения стекла, поэтому изменением показателя преломления пренебрегли. Температурное поле в стеклянной пластине рассчитывалось по формуле

$$\Delta T = \frac{\lambda k(x, y)}{\alpha l_0},$$

где α — коэффициент линейного расширения стекла.

Рассчитанное температурное поле в пластине представлено на рис. 5 и 6.

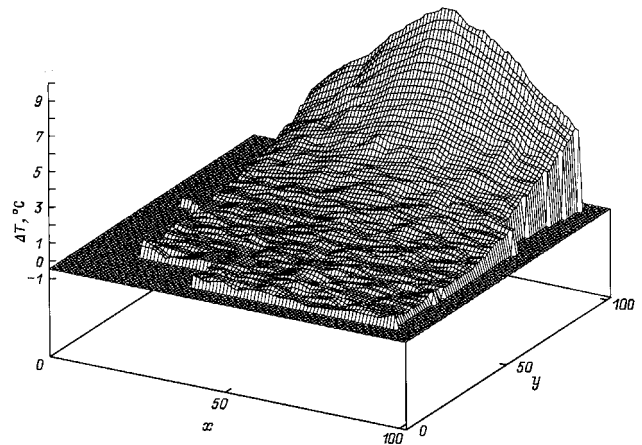


Рис. 5.

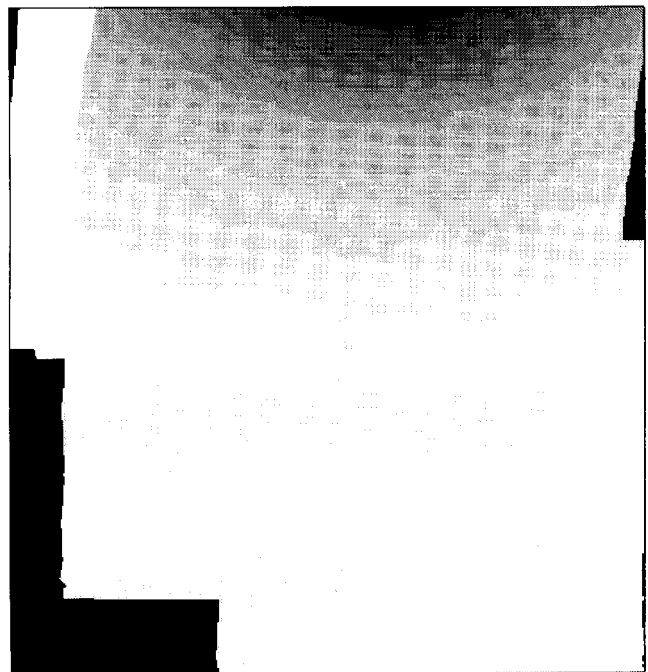


Рис. 6.

Обсуждение результатов

Наиболее спорным в представленном алгоритме является выбор вида фильтрации изображения и кратности применения выбранного фильтра. Из-за наличия рассеивающих центров в оптической системе возникает спекл-шум. Именно он приводит к образованию большей части ложных максимумов и минимумов на интерферограмме. При известных оптических характеристиках системы характерный размер спекла определяется по формуле (7)

$$b_s = 1.22 \frac{(1 + M)\lambda f}{D},$$

где f — фокусное расстояние объектива, M — коэффициент увеличения, D — размер апертуры.

Пространственная частота спекл-структуры $\nu_s = 1/b_s$. Но так как спекл-шум является мультипликативным, построить фильтр непосредственно в частотной области нельзя. Фильтр скользящего среднего и спиновый фильтр, но примененный большее число раз, одинаково эффективны. При работе с интерферограммами, период полос на которых мал, а шумы незначительны, лучше применять спиновый фильтр: частые максимумы и минимумы интенсивности (соответствующие полосам) не исчезнут вместе с ложными экстремумами. Остальные параметры в обработке интерферограмм выбирались в зависимости от периода полос. Погрешность расчета характеристик физического процесса по интерферограммам связана в первую очередь с ошибкой выделения скелетных линий. Несмотря на поэтапную фильтрацию, выделенная скелетная линия может проходить по точкам, координаты которых не удовлетворяют условию (2). Так как наличие этих точек обусловлено спекл-шумом, можно предположить случайность их разброса около истинной скелетной линии. Погрешность можно оценить, зная заранее форму полос на интерферограмме. В проведенных экспериментах в начальный момент времени на интерферограмме вводились прямые параллельные полосы. По изображению с выделенными скелетными линиями рассчитывался средний коэффициент наклона прямых. Погрешность оценивалась по формуле [8]

$$\Delta = t_{0.95}\sigma,$$

где $t_{0.95} = 2.5$ — коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 0.95; σ — среднеквадратичное отклонение, рассчитанное по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2}{n}},$$

где n — число точек; x_i, y_i — координаты точек, принадлежащих выделенным скелетным линиям; \bar{x}_i, \bar{y}_i — координаты соответствующих прямых.

По оценке погрешности измерения изменения показателя преломления из-за выделения скелетных линий 8%.

Так как поставленные задачи не были решены аналитически, то результаты оценивались качественно.

Распределение температуры в жидкости в самом начале процесса позволяет увидеть характерные для этого процесса явления: начальный участок струи, отражение ее от стенок, термический пограничный слой около клина. На рис. 3 температурное поле имеет существенную асимметрию. Это может быть обусловлено наклоном сопла и естественной конвекцией нагретой жидкости.

Задача о распространении тепла в стекле. Максимум температуры находится у края пластины с нагревательным элементом, около геометрического центра источника тепла. По мере удаления от этой точки температура спадает и достигает начальной. Зона прогрева стекла, а также значение максимума увеличиваются с ростом времени нагревания.

Ошибки при расчете изменения показателя преломления связаны с предположением об однородности исследуемого объекта вдоль линии наблюдения. Без проведения дополнительных измерений они не могут быть оценены.

Точность метода голографической интерферометрии в определении температуры может быть рассчитана следующим образом. При сдвиге полосы на $1/100$ и толщине объекта 1 см по формуле (3) $\Delta n = 0.63 \cdot 10^{-6}$, что соответствует изменению температуры на $6.6 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$. Для оценки использованы данные для диапазона температур 20–25°C для воды [9].

Выводы

Метод голографической интерферометрии имеет существенные преимущества перед другими методами исследования, поскольку является бесконтактным и не вносит возмущений в исследуемый объект, а также позволяет рассчитывать характеристики процесса практически в каждой наблюдаемой точке с высокой степенью точности. Однако процесс получения количественной информации посредством анализа интерференционных картин является трудоемким, и именно на этом этапе происходит потеря присущей методу точности. Проведенная работа делает возможным использование метода голографической интерферометрии для получения количественных характеристик некоторых процессов.

Преимуществами описанного алгоритма является малое количество требуемых параметров, причем некоторые из них могут быть определены для конкретной оптической системы заранее и не требуют корректировки в дальнейшем.

В заключение авторы хотят поблагодарить Л.М. Малхасяна и В.М. Левушкина за помощь, оказанную в проведении настоящих работ.

Список литературы

- [1] *Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 336 с.
- [2] *Борыняк Л.А., Логинов А.В., Меднис П.М., Сарнадский В.Н.* // Автометрия. № 4. 1993. С. 59–79.
- [3] *Научно-технический отчет* по теме "Методика получения, первичной и математической обработки интерферограмм сверхзвуковых газодинамических объектов". СПб.: ФТИ им. Иоффе, 1993. 99 с.
- [4] *Ушаков А.М.* // Цифровая обработка сигналов и ее применения. М.: Наука, 1981. С. 99–125.
- [5] *Павлидис Т.* Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М.: Радио и связь, 1986. 400 с.
- [6] *Qifeng Yu, Xiaolin Liu, Klaus Andresen* // Appl. Opt. 1994. Vol. 33. N 17. P. 3705–3715.
- [7] *Фомин Н.А.* Спекл-интерферометрия газовых потоков. Минск: Наука и техника, 1989. 168 с.
- [8] *Худсон Д.* Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.
- [9] *Handbook of Chemistry and Physics.* 37th edition. Chemical Rubber Publishing Co, 1955–1956. 3156 p.