

На правах рукописи



Скляренко Максим Сергеевич

**МЕТОДЫ ВЫСОКОТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И
СКОРОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО ДАННЫМ ЦИФРОВОЙ
ФОТОСЪЕМКИ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск – 2009

Работа выполнена на кафедре компьютерных систем и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Пермский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Марценюк Михаил Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сметанин Анатолий Михайлович

кандидат физико-математических наук
Дроздов Александр Юрьевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет»

Защита состоится «24» декабря 2009 г. в 15⁰⁰ часов в ауд. №2 на заседании диссертационного совета ДМ 212.275.03 в Удмуртском государственном университете по адресу: 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского государственного университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Крылов П.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для последнего десятилетия характерны быстрое развитие технологий и методов компьютерной обработки цифровых изображений, а также появление скоростной цифровой фотоаппаратуры. Современные ПЗС-матрицы обладают разрешающей способностью более 2048x2048 пикселей, высоким квантовым выходом в диапазоне от 200 до 1000 нм, динамическим диапазоном порядка 10^5 . Современные скоростные фотокамеры позволяют осуществлять съемку с частотой более 10000 кадров/с. Это открывает новые возможности использования оптических методов для высокоточных измерений при проведении различных физических экспериментов.

Многие физические явления и величины, их характеризующие, являются по своей сути оптически наблюдаемыми. В случае если исследуется механическое движение тела или системы тел, координаты могут быть непосредственно наблюдаемы в оптическом диапазоне. Необходимо лишь нанести на нужные части тел метки. Для обеспечения оптической наблюдаемости других физических процессов может потребоваться их предварительная визуализация.

Традиционно при исследовании течений жидкости использовались фотографии треков частиц, переносимых потоком. После внедрения в физический эксперимент компьютеров и цифровых фотокамер данный подход обрел вторую жизнь. В последнее десятилетие за этими методами закрепились аббревиатуры *PIV* – *Particle Image Velocimetry*, *PTV* – *Particle Tracer Velocimetry*. Эти методы требуют внесения в поток жидкости светорассеивающих частиц, для освещения которых используют спаренные импульсные лазеры. Данные светорассеивающие частицы служат трассерами потока.

Методы *PIV*, *PTV* требуют использования дорогостоящей аппаратуры, а также специализированного программного обеспечения для восстановления полей скорости. На практике существуют задачи, где в качестве трассеров могут выступать естественные оптические неоднородности среды. Примером может служить задача восстановления поля скорости в турбулентных конвективных потоках по теневым картинкам. В данной задаче возникают трассеры, имеющие распределенную геометрию, что существенно отличается от задач *PIV*, *PTV*, где используются точечные трассеры. Использование современных методов обработки изображений, учитывающих геометрию трассера, может позволить существенно снизить стоимость гидродинамических экспериментов, а также позволит бесконтактно измерять поле скорости в жидких средах. Помимо измерения

полей скорости в жидкостях перспективным направлением является исследование массопереноса по данным цифровой фотосъемки.

Методы цифровой обработки изображений находят применение в задачах анализа данных астрономических наблюдений, таких как реконструкция полей скорости солнечной плазмы, распознавание формы галактик и др.

Перспективным представляется направление, связанное с исследованием предварительно визуализированных скалярных физических полей: поля температуры, поля концентрации и других. Стоит отметить, что данные методы позволяют получать не только качественную, но и количественную картину исследуемого физического процесса. Для количественных измерений требуется провести предварительную калибровку, т.е. выявить зависимость между значением измеряемой физической величины и какой-либо оптической характеристикой (яркостью, цветовым оттенком, насыщенностью цвета) пикселей изображения визуализированного поля.

Несмотря на успешное применение оптических методов в эксперименте, многие из них позволяют получать лишь качественную картину исследуемого явления, поскольку результаты обрабатываются относительно простыми цифровыми методами.

Привлечение современных средств регистрации изображений, методов цифровой обработки изображений, распознавания образов позволит осуществлять высокоточное количественное исследование оптически наблюдаемых или специально визуализированных физических процессов. Обработка больших массивов данных, полученных в ходе экспериментов, может быть в значительной степени автоматизирована. Это позволяет исследователю экономить время, затрачиваемое на проведение анализа и интерпретацию данных, а также на идентификацию изучаемых процессов на основе моделей, построенных для их описания.

Цель работы

Целью работы является разработка специализированных методов высокоточного определения координат и скоростей физических процессов, основанных на компьютерной обработке цифровых изображений, которые были получены как путем непосредственной цифровой фотосъемки в оптическом диапазоне, так и путем визуализации имеющихся экспериментальных данных; а также разработка методов автоматической обработки полученных экспериментальных данных, необходимой для их анализа и интерпретации.

Задачи работы:

1. Разработка метода реконструкции поля скорости на поверхности конвективной оболочки Солнца по магнитограммам, включая метод автоматического распознавания идентичных трассеров и построение поля скорости солнечной плазмы.
2. Разработка и апробация методики исследования и идентификации параметров механических движений на примере а) колебательных систем с одной и двумя степенями свободы с помощью скоростной фотосъемки б) параметров локомоторной модели.
3. Разработка метода измерения поля концентрации окрашенных веществ в плоском слое жидкости по данным цифровой фотосъемки и метода идентификации линейной модели процесса конвективной диффузии окрашенных веществ в плоском горизонтальном слое жидкости на основе анализа динамики собственных мод поля концентрации.
4. Разработка цифрового фотооптического метода определения коэффициента диффузии окрашенных веществ в жидких средах.

Научная новизна результатов

Автором созданы специализированные методы обработки изображений, которые позволяют с высокой степенью точности определять координаты и скорости физических процессов путем анализа их изображений. Разработаны и апробированы новые методы экспериментального исследования, основанные на цифровой обработке изображений физических процессов, в частности:

1. Разработан метод автоматизированного восстановления поля скорости на поверхности конвективной оболочки Солнца по магнитограммам [14,15].
2. Разработан метод высокоточного определения по данным цифровой фотосъемки координат объекта, совершающего плоское движение [7]. Обоснованы критерии применимости данного метода. Разработаны и экспериментально проверены методики идентификации механических колебательных систем [6,7,9-13]. Идентифицированы параметры мехатронной модели локомоторного поворота [1-3].
3. Разработан метод экспериментального исследования и идентификации параметров линейной модели процесса конвективной диффузии окрашенных веществ в плоском горизонтальном слое жидкости, основанный на изме-

рении динамики поля концентрации по данным цифровой фотосъемки [4,8].

4. Разработан новый фотооптический способ определения коэффициента окрашенных веществ в жидких средах (получен патент на полезную модель [16], подана заявка на изобретение [17]), не требующий использования дорогостоящей измерительной аппаратуры, и два варианта установки для его осуществления.

Автором выносятся на защиту:

1. Метод реконструкции поля скорости на поверхности конвективной оболочки Солнца по магнитограммам и результаты восстановления поля скорости по магнитограммам.

2. Метод высокоточного определения по данным скоростной цифровой фотосъемки координат объектов, совершающих плоское механическое движение. Экспериментальные результаты исследований свободных механических колебаний физического маятника с одной степенью свободы в линейной и нелинейной областях [6,7,12], вынужденных колебаний [9-11]. Результаты идентификации свободных и вынужденных колебаний в системе с двумя степенями свободы (связанные маятники) [9]. Результаты идентификации параметров мехатронной модели локомоторного поворота [1-3].

3. Метод измерения поля концентрации окрашенных веществ в плоском слое жидкости. Результаты идентификации линейной модели процесса конвективной диффузии перманганата калия в плоском горизонтальном слое воды, основанные на анализе динамики собственных мод по экспериментальным данным.

4. Новый фотооптический способ определения коэффициента диффузии окрашенных веществ в жидких средах и два варианта установки для его осуществления.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Международной научно-практической конференции “Компьютерное моделирование 2007” (Санкт-Петербург, 26-27 июня 2007 г.), 11-ой Пулковской международной конференции по физике Солнца ГАО РАН “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений” (Санкт-Петербург, 2-7 июля 2007 г.), Международной конференции “Современные проблемы механики сплошных сред” (Ростов-на-Дону, 26-28 ноября 2007 г.), Всероссийской научно-

практической конференции “Проблемы формирования информационно-коммуникационной компетентности выпускника университета начала XXI века” (Пермь, 13-15 ноября 2007 г.), 10-й международной научно-технической конференции “Компьютерное моделирование 2009” (Санкт-Петербург, 23-24 июля 2009 г.), Пермском гидродинамическом семинаре им. Г.З. Гершуни и Е.М. Жувицкого (21 сентября 2007 г.), Пермском городском научно-методическом семинаре “Информационные и коммуникационные технологии в образовании” (5 апреля 2007 г.).

На установку для определения коэффициента диффузии окрашенных веществ в жидких средах получен патент на полезную модель [16]. Доклады на Международной научно-практической конференции “Компьютерное моделирование 2007” (Санкт-Петербург, 26-27 июня 2007 г.) и 10-й международной научно-технической конференции “Компьютерное моделирование 2009” (Санкт-Петербург, 23-24 июля 2009 г.) были отмечены грамотами.

Достоверность результатов. Применимость и эффективность разработанных методов подтверждается их экспериментальной проверкой и согласованностью с моделями, описывающими исследуемые процессы в областях, где адекватность моделей подтверждена многочисленными результатами других авторов. Результаты восстановления поля скорости на поверхности конвективной оболочки Солнца по магнитограммам качественно согласуются с данными других наблюдений. Полученные экспериментальные результаты по исследованию колебательных систем находятся в полном согласии с их теоретическими моделями.

Адекватность разработанного метода измерения поля концентрации окрашенных веществ в плоском слое жидкости, а также основанного на нем способа измерения коэффициента диффузии подтверждаются результатами измерений коэффициента диффузии красителя в воде, которые согласуются с данными других авторов и процедурой идентификации процесса диффузии, разработанной для этой цели.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 статьях, две из которых [7,10] опубликованы в журнале, входящем в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандида-

та наук, в опубликованном сведении о патенте на полезную модель, тезисах докладов конференции (1) и трудах конференций (8).

Практическая ценность. Предлагаемый метод восстановления поля скорости плазмы на поверхности конвективной оболочки Солнца по магнитограммам может применяться широким кругом исследователей в области физики Солнца и магнитной гидродинамики, например в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкарёва РАН.

Полученные результаты по исследованию колебаний могут быть использованы для создания приборов по контролю вибраций станков, для исследования механических моделей колебаний молекулярных систем, колебаний сложных хаотических систем (маятник Горелика (эластичный маятник)), в исследовательском лабораторном практикуме при обучении магистров, могут найти применение в задачах высокоточной идентификации положения и движений лабораторных и промышленных роботов.

Предлагаемые методы измерения поля концентрации и идентификации моделей процессов массопереноса могут найти применение в лабораторных научных исследованиях диффузии в неоднородных жидких средах, процессов массопереноса при наличии внешних полей и вынужденной конвекции. Способ определения коэффициента диффузии окрашенных веществ в жидкостях может найти применение в текстильной и пищевой промышленности, а также лабораторных исследованиях зависимости коэффициента диффузии красителей в воде и других растворителях от различных внешних факторов (концентрации примесей, температуры среды, интенсивности внешних полей).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 93 наименования. Общий объем диссертации составляет 169 страниц, включая 101 рисунок и 5 таблиц.

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Рассматриваются некоторые области применения оптических методов в экспериментальной физике, приведены цели и задачи работы, обоснована актуальность поставленных задач.

Первая глава. Показано, что ПЗС-матрицы могут служить основой для высокоточных измерений в различных физических экспериментах, связанных с ре-

гистрацией и последующим анализом изображений. Приведен обзор основных методов цифровой обработки изображений: повышение качества, выделение границ и т.д. Обосновано то, что современные методы цифровой обработки изображений могут служить основой для высокоточного определения параметров физических процессов по их изображениям.

Вторая глава. Разрабатывается метод восстановления поля скорости на поверхности Солнца по магнитограммам, на которых отображается интенсивность z-компоненты напряженности магнитного поля (см. рис. 1). В областях высокой интенсивности магнитного поля происходит подавление восходящих конвективных потоков горячей плазмы, что приводит к понижению температуры поверхности и возникновению темных пятен. Пятна (магнитное поле) увлекаются движущейся средой и служат трассерами скорости на поверхности конвективной оболочки.

Предлагаемый метод расчета поля скорости основан на выделении пар эволюционирующих трассеров на соседних по времени магнитограммах. Смещение характерных точек трассеров сопоставляется со смещением точек среды. При расчете поля скорости учитывается, что вследствие вращения Солнца вокруг своей оси трассеры участвуют в двух движениях: перемещениях по диску вследствие вращения Солнца и локальных перемещениях, которые и представляют интерес для исследования. Основные этапы предлагаемого метода таковы:

1) На исходной магнитограмме выделяется исследуемая прямоугольная область (сегмент).

2) На следующей магнитограмме ищется область, наиболее коррелированная с исходным сегментом.

3) По трассерам восстанавливается поле скорости в системе координат, связанной с левым верхним углом исследуемой области. Трассеры выделяются по двум порогам по яркости пикселей. На двух соседних по времени магнитограммах идентифицируются пары трассеров. Трассер при движении меняет свою форму и размер, поэтому этап идентификации пар трассеров представляется наиболее сложным. Для описания формы и размеров трассера вводится вектор \vec{V} :

$$V_1 = M_{20} + M_{02},$$

$$V_2 = (M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2,$$

$$V_3 = (M_{30} - 3M_{12})^2 + (3M_{21} - M_{03})^2,$$

где $M_{pq} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^p (y_i - \bar{y})^q$ – центральные моменты трассера. Стоит отметить, что данное векторное представление инвариантно относительно сдвигов и поворотов трассера. Наиболее похожи те трассеры, векторные коды которых соответствуют наиболее близким точкам в пространстве V . При поиске наиболее похожих трассеров учитывается также их тип (светлые пятна на магнитограммах сопоставляются со светлыми, темные – с темными).

Как показали эксперименты, образование пар трассеров из наиболее похожих друг на друга трассеров ведет к перепутыванию трассеров из-за значительного искажения их формы в процессе движения. Это, в свою очередь, приводит к появлению ошибочных векторов скорости. Для уменьшения количества ошибочных пар трассеров предложено два специализированных метода.

Поле скорости пересчитывается с учетом поправки на вращение Солнца вокруг своей оси (дифференциальное вращение не учитывается, используется модель вращающейся сферы). Поля скорости, полученные по парам соседних по времени магнитограмм, усредняются, затем среднее поле скорости сглаживается фильтром Шапиро и визуализируется.

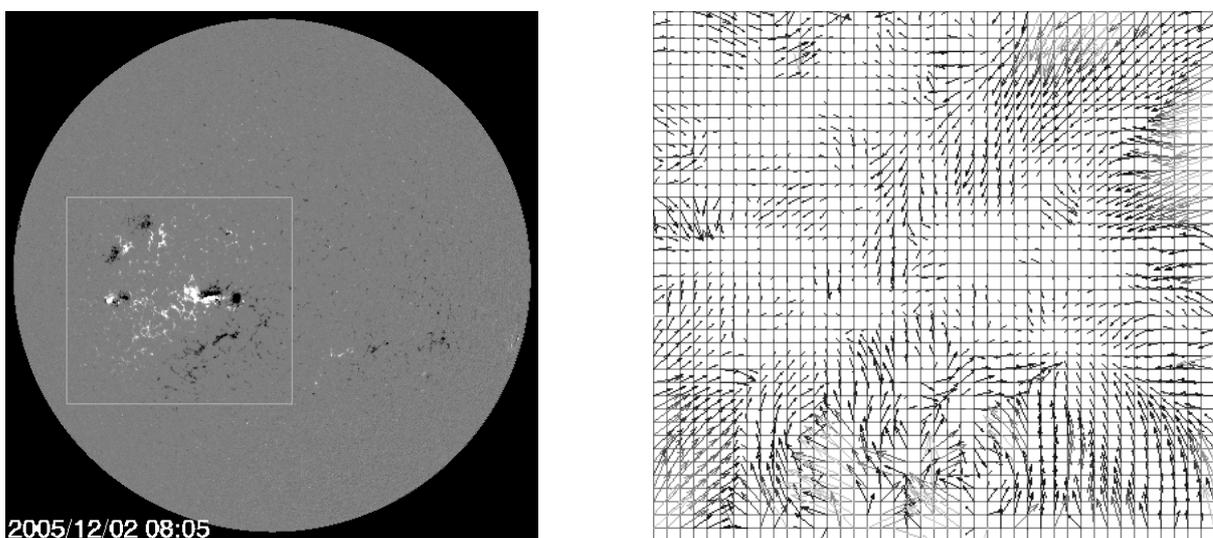


Рис. 1. Магнитограмма исследуемого сегмента поверхности Солнца и результата реконструкции усредненного за период с 2005.12.02 08:05 по 2005.12.06 17:41 поля скорости

Третья глава. Разрабатывается метод высокоточного определения по данным цифровой фотосъемки координат механического объекта, совершающего плоское движение. В качестве координат объекта используются координаты центра круглой или эллиптической метки, предварительно закрепленной на объ-

екте. Контур метки отслеживается на серии кадров, соответствующих различным моментам времени. Для отслеживания контура метки на серии кадров, используется подход, основанный на выделении границ одним из известных методов (например, методом Кэнни) и поиске максимально похожей на контур метки границы (используется метод поиска наиболее похожих трассеров, предложенный в главе 2).

Для определения координат объекта контур метки аппроксимируется окружностью или эллипсом, что позволяет минимизировать погрешность, связанную с возможными неровностями метки, а также с образованием бахромы, разрывов и ложным увеличением числа пикселей на одной из границ метки при выделении ее контура.

Приводятся оценки максимального времени выдержки и минимальной частоты кадров, позволяющих получить значения координат и скорости с заданной максимальной погрешностью. Показано, что ключевым параметром является частота кадров. Например, для обеспечения 5% погрешности в определении координат и скоростей объекта, совершающего гармонические колебания, необходимо осуществлять съемку с интервалом времени между кадрами, равным 0,02 периода колебаний.

Исследуются свободные колебания физического маятника. Маятник выполнен в виде плоского стержня, закрепленного на оси, и способен совершать вращательные колебания в поле тяжести. Рассматривается случай линейного приближения и случай немалых (нелинейных) колебаний. Приведена методика идентификации системы: фазовые траектории, период, фаза, амплитуда, декремент. Предложен критерий определения степени нелинейности системы. Описана методика изучения механических колебаний в лабораторном физическом практикуме [13]. Идентифицированы вынужденные колебания физического маятника, кривая поглощения, фазовая кривая, резонансная частота. Выявлено, что демпфирование колебаний (которое необходимо для уменьшения резонансной амплитуды) посредством закрепления на конце стержня шара, погруженного в кювету с водой, приводит к квадратичной зависимости трения от скорости (см. рис. 3). Исследованы переходные режимы вынужденных колебаний физического маятника.

Приведены результаты идентификации системы с двумя степенями свободы (связанные маятники). Определены собственные частоты, получены кривые поглощения, на которых наблюдаются два максимума.

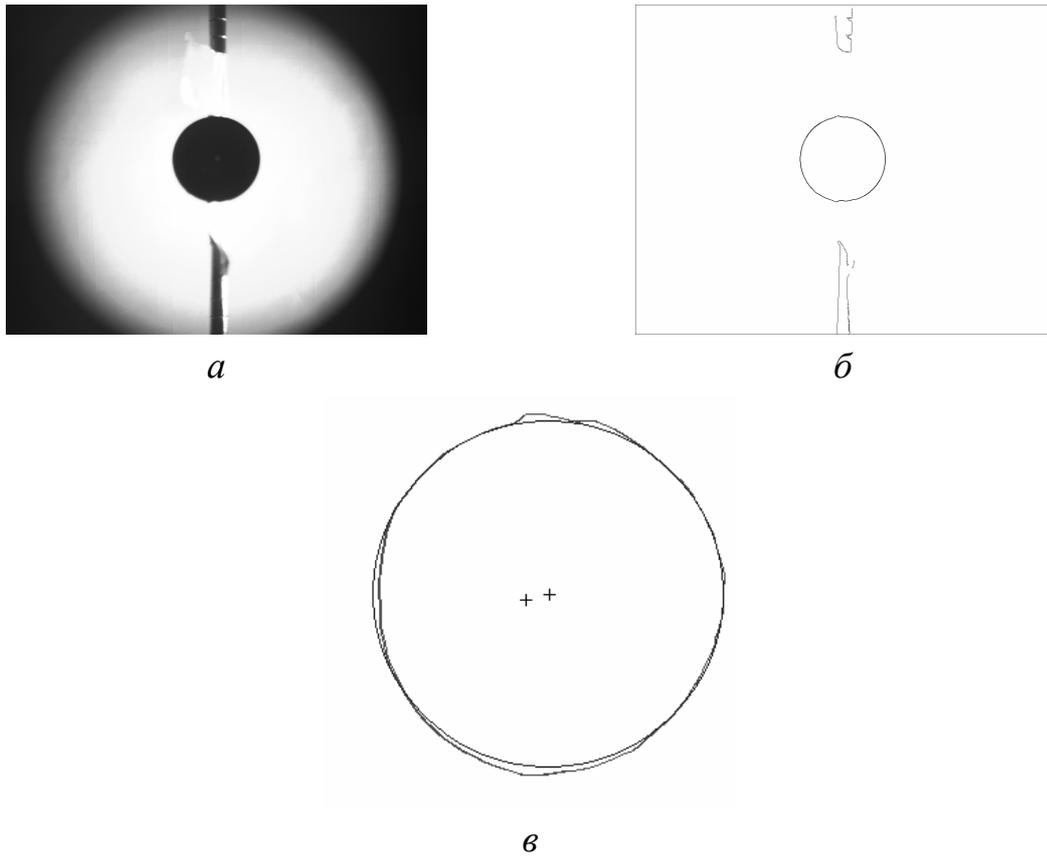


Рис. 2. Изображение маятника (а), выделенные контуры (б), определение центра метки (в)

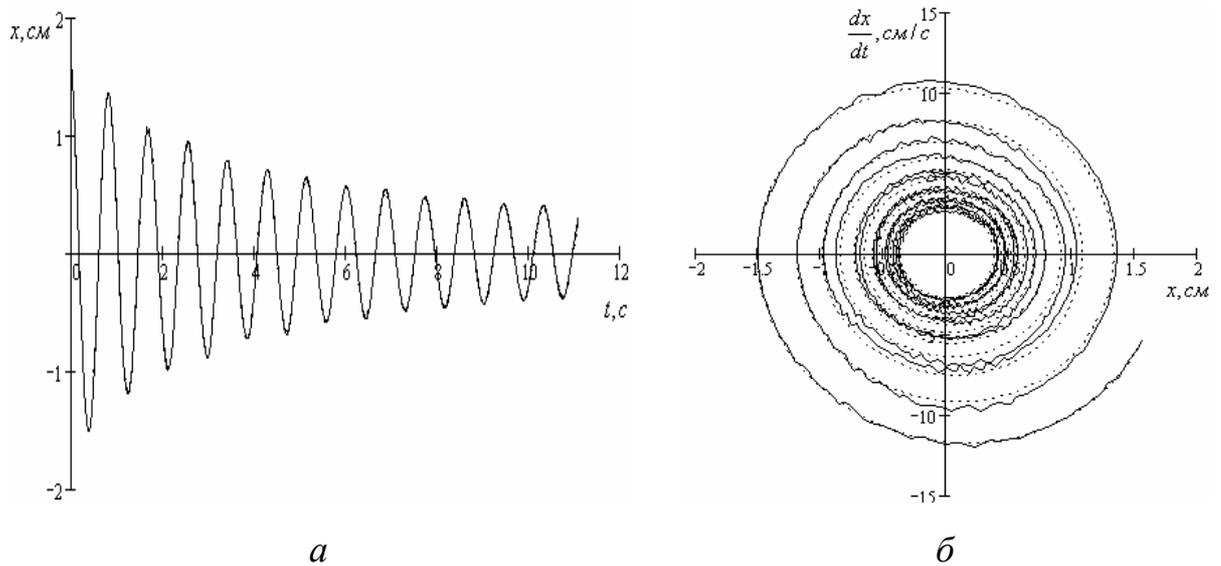


Рис. 3. Свободные демпфированные колебания: а – зависимость координаты от времени, б – фазовая траектория; сплошная линия – эксперимент, пунктир – результат аппроксимации квадратичным трением

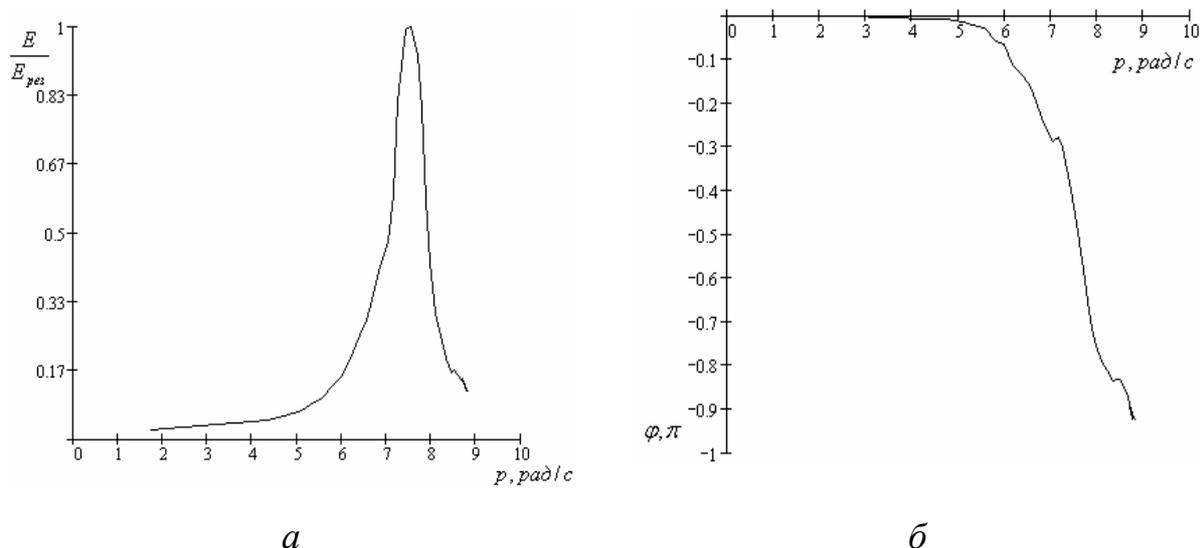


Рис. 4. Кривая поглощения (а) и фазовая характеристика (б)

Четвертая глава. Рассматривается теоретическое описание модели локомоторного поворота, приведена натурная модель и результат ее идентификации.

Кинематическая схема модели показана на рис. 5.а. Массивные рычаги 1, 2 подвешены на осях роторов шаговых двигателей 3, 4. Статоры двигателей 3, 4 объединены общей балкой 10, которая в свою очередь подвешена на оси ротора шагового двигателя 5. На этой же балке 10 смонтированы аккумуляторы, питающие шаговые двигатели, и электронный блок управления 9, задающий программу включения шаговых двигателей. Статор шагового двигателя 5 жестко связан с массивным диском 6. Диск 6 подвешен на шарике, находящемся в верхней части оси 7. Ось 7 жестко закреплена на лабораторном столе. Модель сбалансирована таким образом, что как единое целое легко вращается вокруг оси 7. Таким образом, модель представляет собой автономный объект, который при определенной программе управления шаговыми двигателями может совершить поворот вокруг оси 7 за счет внутренних сил, вызывающих изменения формы.

Пятая глава. Разрабатывается метод измерения поля концентрации окрашенных веществ в плоском слое жидкости. Для измерения концентрации цветного диффузанта в каждой точке плоского слоя жидкости (см. рис. б) используется следующая методика. В качестве калибровочной зависимости используется зависимость концентрации от яркости раствора. Для получения калибровочной точки в ячейку помещают тонкий слой раствора известной концентрации (при этом толщина слоя должна быть одинаковой как при получении калибровочных точек, так и при измерении концентрации в основном эксперименте). По изображению определяется средняя по пикселям яркость раствора. Яркость пикселя

можно определять следующими способами: $B = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_i$, где I_i – интенсивности цветовых компонент в палитре RGB , или $B = V$, где V – значение V в палитре HSV (*Hue Saturation Value*). Для исключения зависимости от яркости осветителя (осветителей) вводится понятие относительной яркости $\frac{B_d}{B_b}$, где B_d – яркость раствора, $\overline{B_b}$ – средняя яркость фона.

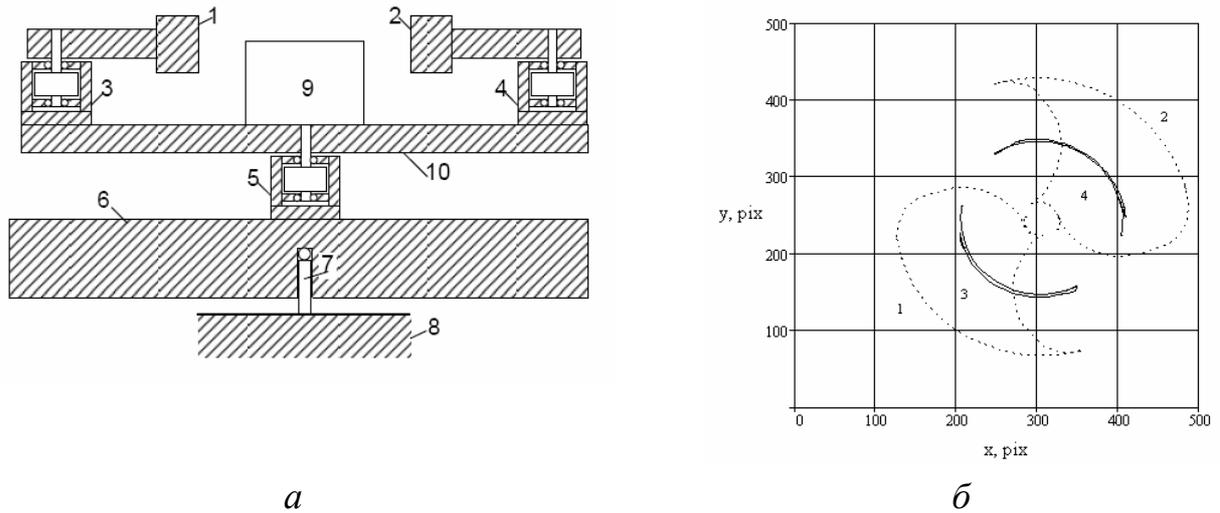


Рис. 5. Кинематическая схема мехатронной модели (а) и результат идентификации траекторий подвижных частей модели (б)

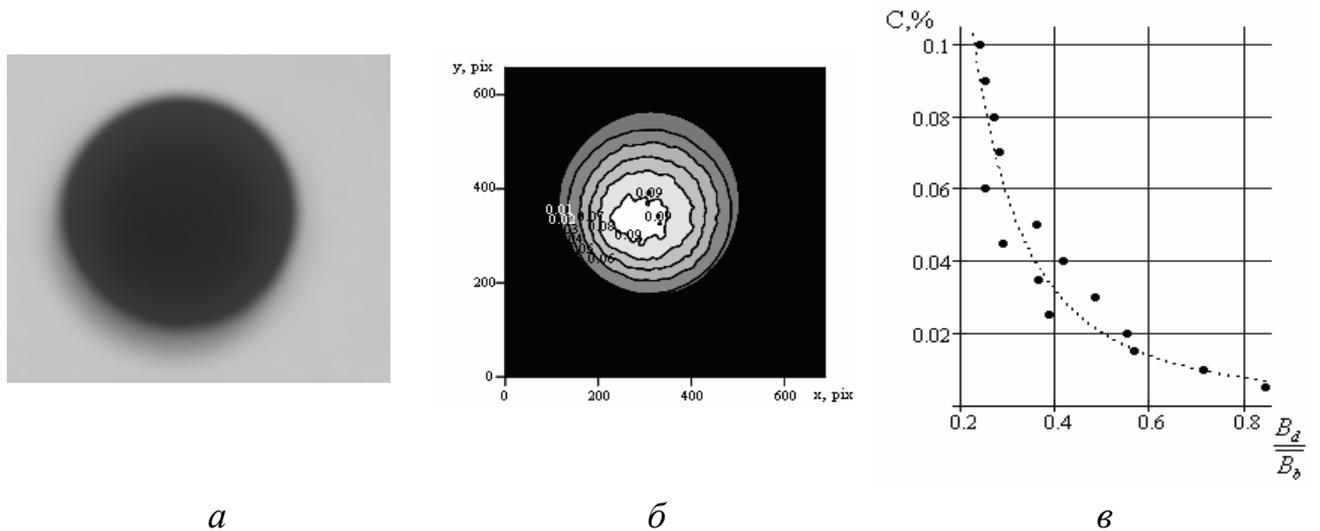


Рис. 6. Восстановление поля концентрации для красного тканевого красителя: а – диффузионное пятно, б – поле концентрации, в – калибровочная зависимость

Для измерения концентрации диффузанта по относительной яркости с использованием полученной калибровочной зависимости требуется предварительное выделение областей проникновения диффузанта (диффузионных пятен), так как в областях отсутствия диффузанта нельзя применять калибровочную зависимость. Области проникновения диффузанта выделяются на изображении по задаваемым диапазонам значений H, S (цветовой оттенок и насыщенность) в палитре HSV .

Приведены результаты идентификации линейной модели процесса конвективной диффузии перманганата калия в плоском горизонтальном слое воды, основанные на анализе динамики собственных мод. Обнаружено наличие недиффузионных эффектов. Экспериментальные данные с хорошей степенью точности аппроксимируются предложенной линейной моделью процесса.

Показана возможность создания концентрационного диполя и применения теории мультиполей к анализу процесса диффузии.

Рассматривается фотооптический способ определения коэффициента диффузии окрашенных веществ в жидких средах и два варианта установки для его реализации (см. рис. 7). Способ основан на использовании описанного выше метода измерения концентрации окрашенных веществ. Для определения коэффициента диффузии в плоскопараллельную вертикальную ячейку по очереди заливаются растворитель и раствор известной концентрации (для погашения гравитационной конвекции сначала заливается более тяжелый компонент). На временах, пока значительные изменения концентрации не достигли границ ячейки (например, для квадратной ячейки размером 6х6 см и при коэффициенте диффузии порядка 10^{-5} см²/с это время составляет порядка 1000 часов), можно считать, что поведение концентрации в ячейке описывается уравнением Фика со следующими граничными условиями:

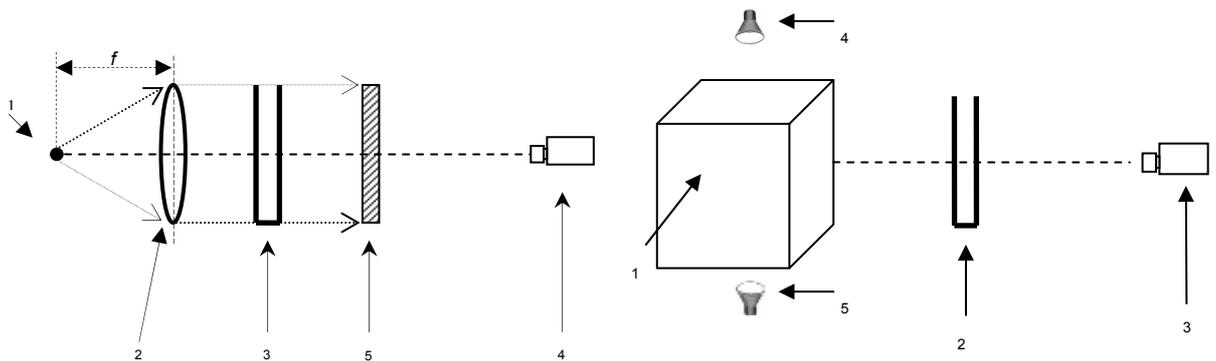
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad C(x = +\infty) = C_1, \quad C(x = -\infty) = C_2, \quad (1)$$

где C – концентрация на расстоянии x от середины ячейки через время t после начала процесса диффузии, C_1 – начальная концентрация в верхней половине ячейки, C_2 – начальная концентрация в нижней половине ячейки, D – коэффициент диффузии. Решение граничной задачи (1) имеет вид:

$$C(y) = \frac{C_1 + C_2}{2} - \frac{C_2 - C_1}{2} \operatorname{erf}(y), \quad (2)$$

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-\alpha^2} d\alpha \text{ – интеграл ошибок, } y = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}.$$

Через время t после начала процесса диффузии (4-5 часов при D порядка 10^{-5} см²/с) производится фотографирование ячейки. На расстоянии x (2-3 мм) от середины ячейки по цифровому изображению определяется среднее по координате z (см. рис. 8) значение относительной яркости. По калибровочной зависимости определяют значение концентрации. Решение уравнения (2) относительно неизвестного D дает значение коэффициента диффузии.



Освещение коллимированным пучком

1 – точечный источник света, 2 – конденсор, 3 – ячейка, 5 – светорассеивающий экран, 4 – цифровой фотоаппарат

Освещение рассеянным светом

1 – фотокуб, 2 – ячейка, 3 – цифровой фотоаппарат, 4, 5 – осветители

Рис. 7. Варианты установки для измерения коэффициента диффузии

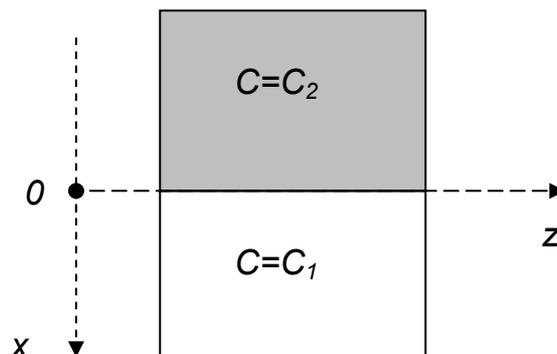


Рис. 8. Начальные условия в ячейке для измерения коэффициента диффузии

Данным способом были определены коэффициенты диффузии бытового красного тканевого красителя в воде и в 1% водном растворе хлорида натрия при температуре 23°C и среднем значении массовой концентрации красителя 0,05%, значения коэффициентов составили $0,16 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ и $0,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Созданы новые методы экспериментального определения координат и скоростей физических процессов, основанные на использовании разработанных автором специализированных алгоритмов цифровой обработки изображений.

1. Разработан метод реконструкции поля скорости и восстановления усредненного поля скорости на поверхности конвективной оболочки Солнца по магнитограммам.

2. Предложен метод высокоточного определения по данным цифровой фотосъемки координат объекта, совершающего плоское механическое движение. Впервые методом скоростной фотосъемки исследованы свободные механические колебания физического маятника с одной степенью свободы в линейной и нелинейной областях, вынужденные колебания. Идентифицированы свободные и вынужденные колебания в системе с двумя степенями свободы (связанные маятники). Предложена постановка лабораторного практикума по физике колебаний. Создана и идентифицирована мехатронная модель локомоторного поворота.

3. Предложен метод измерения поля концентрации окрашенных веществ в плоском слое жидкости, основанный на анализе данных цифровой фотосъемки. На основе анализа динамики собственных мод идентифицированы параметры линейной модели процесса конвективной диффузии перманганата калия в плоском горизонтальном слое воды. Предложена модель концентрационного диполя.

4. Разработан новый цифровой фотооптический способ определения коэффициента диффузии окрашенных веществ в жидких средах и два варианта установки для его осуществления.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. *Кетов А.И., Марценюк М.А., Склярченко М.С., Тетерин А.Л.* Мехатронная модель локомоторного поворота: теория и эксперимент // Компьютерное моделирование 2009. Тр. междунар. научн.-техн. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С.232–235.
2. *Кетов А.И., Марценюк М.А., Склярченко М.С., Тетерин П.А.* Идентификация локомоторного движения мехатронной модели // Вестник Перм. ун-та. 2007. Вып. 10(15). Информационные системы и технологии. С.19–22.
3. *Кетов А.И., Марценюк М.А., Склярченко М.С., Тетерин П.А.* Мехатронное моделирование локомоций // Современные проблемы механики сплошной среды. Тр. междунар. конф.. Ростов-на-Дону, 2007. Т.1. С.158–162.
4. *Марценюк М.А., Склярченко М.С.* Компьютерные методы в учебном исследовании процесса диффузии // Компьютерное моделирование 2007. Тр. междунар. научн.-техн. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С.153–154.
5. *Склярченко М.С.* Методы компьютерного видения в физическом эксперименте // Вестник Перм. ун-та. 2007. Вып. 10(15). Информационные системы и технологии. С.85–93.
6. *Склярченко М.С., Марценюк М.А.* Идентификация параметров механических колебаний по данным скоростной фотосъемки // Телекоммуникационные и информационные системы. Тр. междунар. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С.428–440.
7. *Склярченко М.С., Марценюк М.А.* Экспериментальное исследование механических колебаний методом скоростной фотосъемки // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2007. №4. Т.1. С.167–174.
8. *Склярченко М.С., Марценюк М.А.* Экспериментальное исследование процесса диффузии методами компьютерного видения // Современные проблемы механики сплошной среды. Тр. междунар. конф. Ростов-на-Дону, 2007. Т.1. С.220–224.
9. *Склярченко М.С., Марценюк М.А., Сивков В.Г.* Идентификация вынужденных механических колебаний по данным скоростной цифровой фотосъемки // Вестник Перм. ун-та, 2009. Вып. 9(35). Информационные системы и технологии. С.111-119.
10. *Склярченко М.С., Марценюк М.А., Сивков В.Г.* Исследование вынужденных механических колебаний методом скоростной фотосъемки // Научно-

технические ведомости СПбГПУ, №6, 2009 (выход номера из печати – декабрь 2009).

11. *Скляренко М.С., Марценюк М.А., Сивков В.Г.* Экспериментальное исследование вынужденных колебаний маятника методом скоростной фотосъемки // Компьютерное моделирование 2009. Тр. междунар. научно-технической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С.273–279.

12. *Скляренко М.С., Сивков В.Г., Марценюк М.А.* Идентификация параметров механических колебаний по данным скоростной фотосъемки // Компьютерное моделирование 2007. Тр. междунар. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С.66–67.

13. *Скляренко М.С., Сивков В.Г., Ястребов А.Г.* Постановка практикума по анализу колебаний с помощью компьютерной обработки высокоскоростной фотосъемки // Проблемы формирования информационно-коммуникационной компетентности выпускника университета начала XXI века. Мат. всерос. науч.-практ. конф.. Пермь, 2007. С.472–473.

14. *Скляренко М.С., Фрик П.Г., Ястребов А.Г.* Реконструкция поля скорости по распределенным трассерам // Вычислительные методы и программирование. ВЦ МГУ. 2006. Т.7, №1. С.45–50.

15. *Скляренко М.С., Ястребов А.Г.* Автоматизированное восстановление поля скорости на поверхности конвективной оболочки Солнца по магнитограммам // Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений. Тез. докл. 11 Пулковской междунар. конф. по физике Солнца. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 2007. С.130–132.

16. Патент на полезную модель №87525. Изобретения, полезные модели, 2009, №28 (авторы М.С.Скляренко, М.А.Марценюк).

17. Заявка на изобретение №2009119299 (авторы М.С.Скляренко, М.А.Марценюк).

18. *Марценюк М.А., Машкин С.В., Новиков С.В., Скляренко М.С., Ястребов А.Г.* Компьютерное зрение: учеб.-метод. пособие. Пермь: Изд. Пермского университета, 2007. 204 с.