

на правах рукописи

ГОЛУБЕВ МАКСИМ ПАВЛОВИЧ

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ПОЛЕЙ
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ДАВЛЕНИЯ НА ОБТЕКАЕМЫХ
ПОВЕРХНОСТЯХ**

01.02.05. Механика жидкости газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск, 2009

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
Миронов Сергей Григорьевич

доктор физико-математических наук,
профессор
Маркович Дмитрий Маркович

Ведущая организация:

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ)

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
Павлов Александр Алексеевич

Защита состоится « 16 » октября 2009 г. в « 14 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск-90, ул. Институтская, 4/1.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.035.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2009г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д. т. н.



Засыпкин И. М.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие авиационной и космической техники предъявляет все более высокие требования к количеству и качеству информации, получаемой при изучении аэрофизических процессов. Это ведет к необходимости разработки и внедрения новых, более производительных методов регистрации, что обусловлено следующими факторами:

- любые методы имеют ограничения по чувствительности, точности и диапазону измерений, а также по пространственному и временному разрешению;
- расширение линейки доступных методов позволяет одновременно регистрировать несколько параметров и проводить регистрацию одного параметра альтернативными методиками. Это увеличивает достоверность измерений и служит подтверждением адекватности используемых методов.
- важным является снижение стоимости эксперимента, что требует усовершенствования методов измерения в плане повышения качества и количества получаемой за единицу времени информации.

Оптические методы обладают присущими только им достоинствами, что служит дополнительным стимулом их развития. Это возможность бесконтактной панорамной регистрации интересующего параметра; возможность получения “мгновенной”, по сравнению с характерным временем процесса, информации; высокое пространственное разрешение; возможность в некоторых случаях получения информации, недоступной при использовании других методов.

В настоящее время известен ряд панорамных оптических методов регистрации тепловых потоков и давления на обтекаемых поверхностях и различных способов их реализации. Это регистрация температуры с использованием покрытий на основе термочувствительных красителей, индикаторов плавления, жидкокристаллических (ЖК) покрытий, тепловизионная регистрация поверхностной температуры, регистрация давления с использованием барочувствительных люминесцентных покрытий, регистрации поверхностного трения и давления, основанного на применении эластичных покрытий и др.

Наряду с достоинствами, эти методы обладают рядом недостатков. Например, покрытия на основе термокрасителей и индикаторов плавления, меняющих свою окраску при переходе определенного уровня температуры, позволяют визуализировать только одну или несколько изотерм. Ограничением в использовании ЖК-покрытий является узкий температурный рабочий диапазон. При использовании тепловизоров необходимо наличие информации о коэффициенте серости поверхности. Возможно влияние отраженного поверхностью излучения от более нагретых участков самой модели и конструктивных узлов установки, что особенно проявляется при проведении экспериментов на высокоэнтальпийных установках. Регистрация давления с помощью люминесцентных покрытий требует наличия кислорода в газе. Метод фактически регистрирует не давление, а концентрацию кислорода. Чувствительность ограничена 0.5-1 %/кПа. Малая скорость выравнивания концентрации кислорода в матрице ограничивает применение методики при исследовании быстротекающих процессов. При ис-

пользовании эластичных покрытий на результаты могут оказывать влияние изгибы, перекосы и сдвиги модели. Время обработки занимает 20-30 с на кадр, что не позволяет работать в режиме реального времени.

Эти и иные факторы, ограничивающие точность, динамический диапазон, быстродействие и другие важные метрологические характеристики известных оптических методов, подтверждают актуальность работ по их развитию.

Целью работы являлось теоретическое обоснование, разработка и экспериментальное подтверждение работоспособности новых методов регистрации параметров газовых потоков на обтекаемых поверхностях. Для этого решались следующие **задачи**.

– Разработка общего подхода регистрации параметров потока на обтекаемых поверхностях с использованием методов оптической интерферометрии.

– Разработка и реализация на аэродинамических установках оптического метода регистрации тепловых потоков на обтекаемых поверхностях.

– Разработка и реализация на аэродинамических установках оптического метода регистрации полей давления на обтекаемых поверхностях.

– Развитие разрабатываемых методик для регистрации параметров на искривленных произвольно ориентируемых поверхностях.

Научная новизна работы заключается в том, что

1. Предложен общий подход для панорамных интерференционных методов регистрации тепловых потоков и полей давления на обтекаемых поверхностях с использованием в качестве датчика слоя прозрачного вещества, изменяющего свои оптические свойства под воздействием регистрируемого параметра.

2. Оработана методика регистрации тепловых потоков. В приближении одномерности и линейности тепловой задачи получены общие соотношения, позволяющие по интерферометрическим данным восстанавливать поверхностное распределение теплового потока.

3. Оработана методика регистрации полей давления. В линейном приближении получены соотношения для отклика барочувствительного покрытия, позволяющие по интерферометрическим данным восстановить распределение давления на исследуемой поверхности.

4. Показана возможность использования разрабатываемых методик на искривленных, произвольно ориентированных поверхностях с использованием интерференции в диффузном свете (фазовая спекл-интерферометрия).

5. Получены экспериментальные результаты, доказывающие перспективность разрабатываемых методик. В частности, впервые визуализировано поле давлений от дозвуковой струи ($Re < 1000$), набегающей на стенку, с изменением давления на уровне нескольких миллиметров водяного столба и поле давлений за ударной волной, распространяющейся в канале ударной трубы.

Практическая ценность результатов

Панорамный метод регистрации тепловых потоков позволяет проводить измерения непосредственно тепловых потоков без решения обратной тепловой задачи и может применяться при различных режимах обтекания. Особый инте-

рес представляет при измерениях на высокоэнтальпийных установках импульсного или кратковременного действия. Метод используется для панорамной регистрации полей тепловых потоков на обтекаемых поверхностях на установках ИТПМ СО РАН при до-, сверх- и гиперзвуковых режимах обтекания. Может применяться не только в аэрофизическом эксперименте. С успехом используется для визуализации излучения субмиллиметрового диапазона лазера на свободных электронах.

Панорамный метод регистрации полей давления расширяет возможности измерения и визуализации данного параметра в широком диапазоне режимов обтекания. Для его реализации не требуется специализированных источников лазерного излучения и наличия кислорода в газе. Регистрируется непосредственно давление. Полученные результаты показывают, что минимальный уровень визуализируемых давлений может составлять менее 0.1 мм вод. ст., частотный диапазон регистрируемых пульсаций – до 200 КГц, пространственное разрешение – не хуже 1 мм. В настоящее время иных датчиков с подобными метрологическими характеристиками не существует даже для локальных измерений. Метод позволил впервые визуализировать поле давлений от дозвуковой струи ($Re < 1000$), набегавшей на стенку под углом, с изменением давления на уровне нескольких миллиметров водяного столба и поле давлений за ударной волной, распространяющейся в канале ударной трубы.

Достоверность результатов подтверждается данными тестовых экспериментов, повторяемостью и хорошим согласием результатов оптической диагностики с данными полученными альтернативными методами.

Основные защищаемые положения

– Общий подход реализации панорамных интерференционных методов регистрации параметров на обтекаемых поверхностях с использованием в качестве датчика слоя прозрачного вещества, изменяющего свои оптические свойства под воздействием регистрируемого параметра.

– Аналитические соотношения, позволяющие по интерферометрическим данным восстанавливать поверхностное распределение теплового потока.

– Аналитические соотношения для отклика барочувствительного покрытия, позволяющие по интерферометрическим данным восстановить распределение давления на исследуемой поверхности.

– Результаты, полученные в тестовых экспериментах и при исследовании потоков в аэродинамических трубах, при дозвуковых, сверхзвуковых и гиперзвуковых режимах обтекания, подтверждающие работоспособность и эффективность рассматриваемых методов.

Апробация основных результатов. Основные результаты диссертации представлены в 14 печатных работах, в том числе в учебном пособии, публикациях в журналах и в материалах и трудах научных конференций. Результаты докладывались на семинарах ИТПМ СО РАН, СибНИА и XI – XIII Международных конференциях по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2004, 2007, 2008); 12th International Symposium on the Flow Visualization

(Goettingen, Germany, 2006); IX. Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков" (Москва, 2007) и др.

Личный вклад автора в работу заключается в активном участии в разработке оборудования, необходимого для проведения тестовых экспериментов и реализации представленных в диссертации методов на аэродинамических установках, в тестовых экспериментах по отработке рассматриваемых методик, в аэрофизических экспериментах с их применением, а также в интерпретации и обобщении полученных экспериментальных данных. Непосредственно автором получены основные аналитические соотношения для отклика тепло- и барочувствительных покрытий.

Структура работы. Работа состоит из введения, 3-х глав, выводов и списка литературы. Объем диссертации составляет 127 страниц, в том числе 72 иллюстрации, 6 таблиц, и список литературы из 73 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении, наряду с общими положениями, дан обзор методов регистрации температуры, тепловых потоков и давления на обтекаемой поверхности. Рассматриваются особенности их использования в аэрофизическом эксперименте. Приводятся характеристики используемого в работе оборудования.

В главе 1 рассматривается оптический метод регистрации тепловых потоков. Оптическая схема приведена на рис. 1. На плоскопараллельный слой прозрачного вещества толщиной L подается коллимированный пучок когерентного излучения A_0 под углом γ . Часть излучения отражается от грани P_1 – волна A_1 , а часть, преломившись и пройдя через пластину, отражается от

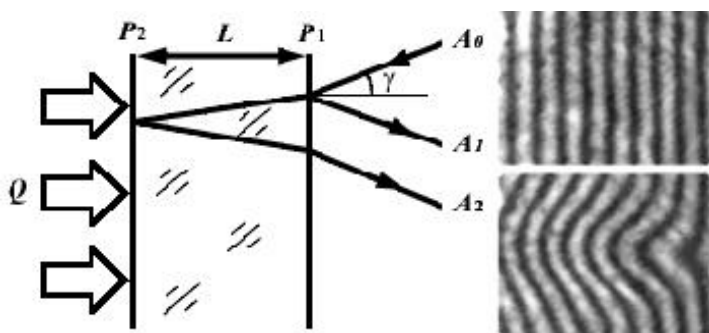


Рис. 1. Схема, поясняющая работу метода и фрагменты типичных интерферограмм.

задней грани P_2 – волна A_2 . Волны A_1 и A_2 интерферируют между собой.

В результате действия теплового потока Q происходит изменение температуры по толщине слоя, что приводит к изменению разницы оптических путей ΔS между волнами A_1 и A_2 и вида интерференционной картины. По сдвигу полос на интерферограммах, зарегистрированных через известный промежуток времени, можно определить значение Q . В общем виде распределение интенсивности на интерферограмме описывается соотношением.

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos[\Delta\phi(x, y)]. \quad (1)$$

Зависимость $\Delta\phi[Q(x, y)]$ получена при следующих допущениях.

1. Изменения показателя преломления n не приводят к изменению направления распространения излучения – параксиальное приближение.
2. Направление излучения ортогонально поверхности слоя, т. е. $\gamma \approx 0$.

3. Учитывались только температурные коэффициенты изменения показателя преломления $\beta = \partial n / \partial T$ и линейного расширения $\alpha = \partial L / L \partial T$. Влияние упругости и пьезооптических эффектов не учитывалось.

4. Распространение тепла вдоль поверхности не учитывалось.

5. Все тепло, вошедшее в датчик, не выходит из его объема.

Показано, что с учетом принятых допущений

$$Q(x,y) = k \cdot dN/dt, \quad (2)$$

где N – номер интерференционной полосы, λ – длина волны зондирующего излучения, C_p – теплоемкость, $k = \lambda \rho C_p / 2(\beta + n\alpha)$ – постоянный для вещества коэффициент. В соотношении (2) температура не присутствует, что исключает необходимость решения тепловой задачи. Измерение сводится к регистрации минимумов двух интерферограмм через заданный промежуток времени.

Непосредственно регистрируемой величиной является сдвиг интерференционных полос ΔN за время Δt . Измерение временных интервалов практически не вносит ошибки в результаты. Более существенной является ошибка в определении ΔN . Для качественных интерферограмм точность определения ΔN обычно составляет $\delta \Delta N \approx 0,05$. Ошибка, связанная с этой величиной,

$$\delta Q(x,y) = k \cdot \delta \Delta N / \Delta t = 0,05 \cdot k / \Delta t.$$

В эксперименте $\delta \Delta N$ может быть значительно больше при шаге полос, сравнимом с пространственным разрешением телекамеры. В работе приводятся соотношения, учитывающие этот фактор. Более сложными для анализа являются связанные с принятыми допущениями погрешности.

1. Перетекание тепла вдоль поверхности. Эффект сказывается в основном в погрешности определения локальных значений теплового потока и ухудшает пространственное разрешение метода.

2. Эффекты упругости и связанные с ними эффекты фотоупругости. В рамках данной работы эти эффекты не рассматриваются.

3. Конечность толщины датчика. При выводе (1) предполагалось, что тепло, вошедшее через рабочую поверхность, остается в объеме датчика, однако это может не выполняться. Для датчика и подложки, изготовленных из одного материала с коэффициентом теплопроводности \aleph при включении теплового потока Q_1 в момент $t = 0$ тепловой поток $Q_2(t)$ через нерабочую поверхность датчика

$$Q_2(t) = Q_1 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\sqrt{\rho L^2 C_p / (4 \aleph t)} \right) \right].$$

Для проверки метода проводились измерения теплового потока от струи, распространяющейся вдоль плоской поверхности (рис. 2, а). Струя газа 1, истекающая из сопла 2, распространяется вдоль поверхности датчика 3 из стекла ЛК5 толщиной 10 мм, рамерами 80×80 мм. Тепловой поток регулировался мощностью подогревателя 4, работающего от источника тока 5. Управление расходом производилось редуктором 6. Излучение лазера 7 ($\lambda=0,65$ мкм) лин-

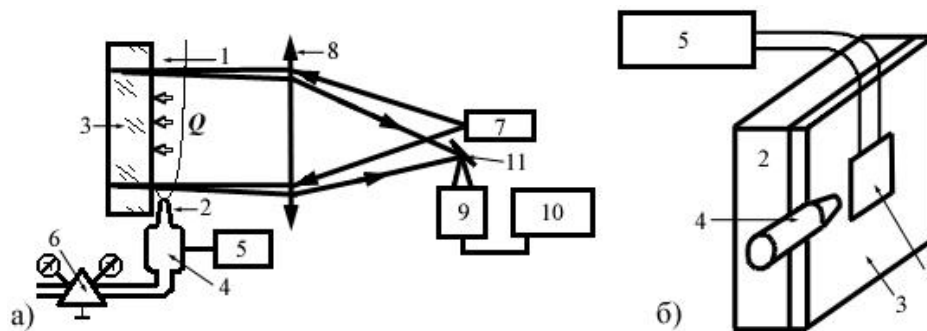


Рис. 2. Схема регистрации тепловых потоков оптическим методом (а) и с помощью ДТП (б).

зой 8 с фокусным расстоянием 500 мм формировалось в плоскопараллельный пучок. Интерферограммы в отраженном свете регистрировались ПЗС камерой 9 и сохранялись на компьютере 10. Угол падения γ не превышал 10^{-2} .

При тех же параметрах проводились измерения (см. рис. 2, б) с помощью паспортизованного термопарного датчика (ДТП) 1, установленного на массивной плоской пластине 2, из алюминиевого сплава, выполняющей роль термостата. Покрытие из оргстекла 3 выполняло роль поверхности. Показания регистрировались вольтметром 5. Размеры ДТП 10×10 мм, толщина 2 мм, чувствительностью 288 Дж/(мВ·м²). В табл. 1 приведены оптические свойства и коэффициент k , рассчитанный по справочным данным для ЛК5, и измеренный экспериментально для органического стекла (ОС) и стекла фирмы Balzers, также использовавшихся в экспериментах.

Таблица 1. Оптические характеристики некоторых стекол и кристаллов

Вещество	n_c	$\beta_c \cdot 10^6, K^{-1}$	$\alpha \cdot 10^7, K^{-1}$	$\rho, г/см^3$	$C_p, Дж/(г \cdot K)$	$k, Дж/см^2$
ЛК5	1,476	6,2	33,9	2,270	0,674	4,440
ОС	1,492	–	350	1,18	1,48	0,442
Balzers	–	–	–	–	–	5,155

Измерения проводились следующим образом. Включались струя воздуха и подогреватель. После выхода подогревателя на стационарный режим осуществлялся быстрый ввод датчика в поток, и производилась регистрация необходимых данных. Без изменения параметров истечения струи проводились последовательно измерения термопарным, оптическим и снова термопарным датчиками. Так как ДТП регистрирует средний по площади тепловой поток, результаты оптических измерений усреднялись по соответствующей площади (рис. 3). Различие результатов измерений оптическим методом и ДТП, не превышало 5%, что является хорошим показателем для подобных измерений.

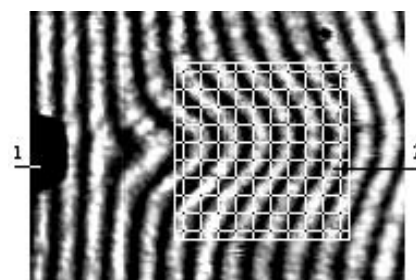


Рис. 3. Положение ДТП и область интегрирования при оптических измерениях. 1 – сопло, 2 – область усреднения.

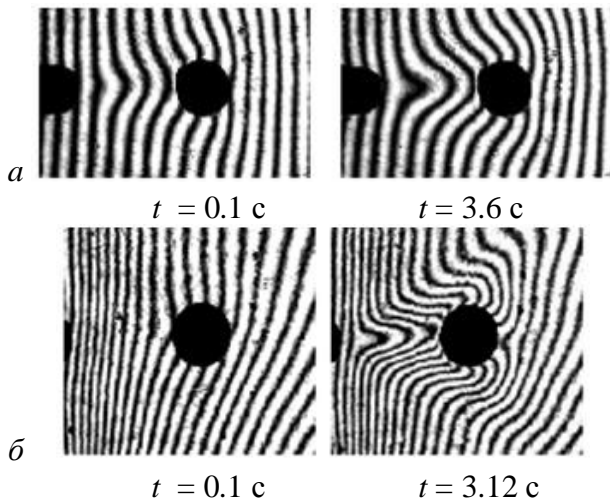


Рис. 4. Обтекание цилиндра. *a* – датчик ЛК5, $W = 44$ Вт; *б* – датчик ОС, $W = 24,9$ Вт.

На рис. 4 показаны интерферограммы, полученные при исследовании обтекания струей цилиндра диаметром 5 мм и высотой 15 мм, установленного вертикально на плоской поверхности. Видно, что датчик из ОС обладает более высокой чувствительностью по сравнению с датчиком из ЛК5. Количественные измерения показали, что чувствительность ОС в 10 раз выше, чем ЛК5. ОС обладает также и более высоким пространственным разрешением. Сдвиг полос в областях с градиентами теплового потока для ОС более резок и четче выражен, что объясняется более низким коэффициентом температуропроводности.

Для оценки пространственного разрешения и теплового потока через обратную поверхность датчика, были проведены эксперименты по регистрации растекания тепловой метки от точечного источника тепла – сфокусированного лазерного излучения мощностью 25 мВт для датчика из ОС. Показано, что пространственное разрешение при временах регистрации $\Delta t < 1$ с составляет порядка 1 мм, а глубина распространения тепловой метки при $\Delta t \approx 2$ с не превышает 1 мм.

Для оценки пространственного разрешения и теплового потока через обратную поверхность датчика, были проведены эксперименты по регистрации растекания тепловой метки от точечного источника тепла – сфокусированного лазерного излучения мощностью 25 мВт для датчика из ОС. Показано, что пространственное разрешение при временах регистрации $\Delta t < 1$ с составляет порядка 1 мм, а глубина распространения тепловой метки при $\Delta t \approx 2$ с не превышает 1 мм.

На рис. 5 представлены результаты применения метода на гиперзвуковой азотной трубе Г-327 для исследования обтекания десятипроцентного дельта-крыла с углом стреловидности $\chi = 70^\circ$ и затупленными передними кромками при $M = 21$, $T_0 = 1700$ К, $P_0 = 84$ бар. Длина модели составляла 100 мм. На верхнюю плоскую поверхность наклеивался датчик из стекла фирмы BALZERS толщи-

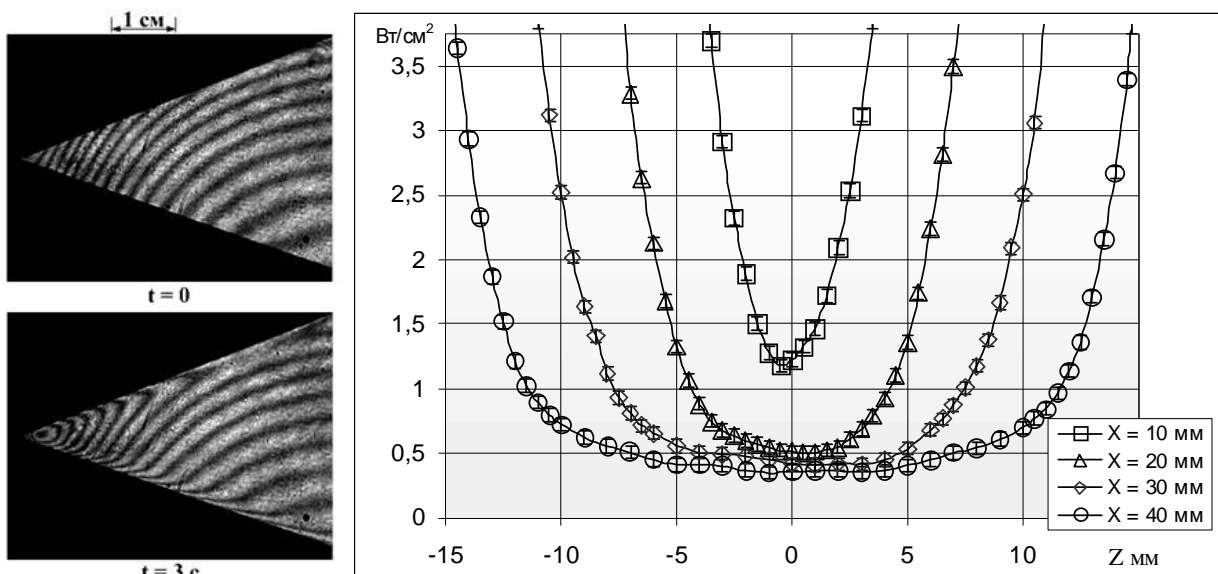


Рис. 5. Регистрация тепловых потоков на наветренной стороне дельта-крыла.

ной 1,5 мм. Измерения проводились для углов атаки $\alpha = 0^\circ, 5^\circ$ и 10° . На рисунке приведены интерферограммы и профили тепловых потоков по размаху крыла для сечений 10, 20, 30 и 40 мм от носика модели, усредненные по трем сериям экспериментов. Наблюдается хорошее совпадение результатов для разных серий.

Метод применялся также при исследованиях взаимодействия косоугольного скачка уплотнения с турбулентным слоем при $M = 3$ в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325М. Так как регистрируется непосредственно количество тепла вошедшего в датчик, метод может использоваться не только при исследовании газовых потоков. Например, в работе [1] с его помощью визуализировалась распределение интенсивности излучения в пучке лазера на свободных электронах (ЛСЭ), работающего в субмиллиметровом диапазоне длин волн, для которого в настоящее время не существует полевых фотоприемников.

Во 2-й главе рассмотрен метод, основанный на применении упругих веществ в качестве материала датчика для регистрации полей давления. При этом $\Delta S = \Delta S(\Delta p)$. Оптическая схема аналогична используемой для регистрации тепловых потоков (см. рис. 1). Изменение $\Delta S(\Delta p)$ в зависимости от давления, сводится к нахождению компонент вектора деформаций. Для регистрации давления по сдвигу интерференционных полос требуется решение обратной задачи. Рассматривалась задача по нахождению деформаций упругого слоя толщиной H . Одна из поверхностей слоя жестко закреплена на подложке (исследуемая модель). Ось Oz направлена ортогонально поверхности датчика в сторону подложки. Для верхней поверхности $z = 0$, для нижней $z = H$.

Задача решалась при следующих допущениях и граничных условиях:

1. Поверхностные нагрузки задаются в виде

$$P(x, y) = P_0 \cos(kx), \quad F(x, y) = F_0 \sin(kx),$$

где P – изменение нормального давления, F – поверхностное трение. При этом задача сводится к двумерной, с зависимостью всех величин только от x и z .

2. Деформации считаются малыми.

3. Объемные силы (гравитация) не учитываются.

4. Деформации на нижней границе равны 0 (условие прилипания).

5. Граничные условия на верхней поверхности деформированного слоя сносятся на границу недеформированного слоя, т. е. на $z = 0$.

Решалось уравнения равновесия [2]

$$(1 - 2\sigma)\Delta \mathbf{u} + \text{grad}(\text{div} \mathbf{u}) = 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{u} = (u_x, u_z)$ – вектор деформаций, а силы входят через граничные условия. Найдено аналитическое решение уравнения (3), для изменения оптического пути в слое толщиной H для нагрузки задаваемой условием 1.

$$\Delta S(x) = \Delta S^* \cos(kx); \quad (4)$$

$$\Delta S^*(k, H) = 2n_0(c_1 + c_3) + 2a[(e^{kH} - 1)(c_1 + d_1 + c_2/k) - (e^{-kH} - 1)(d_3 - c_3 + c_4/k)], \quad (5)$$

где $a = (n_0^2 + 2)(n_0^2 - 1)/6n_0$, n_0 – коэффициент преломления невозмущенного слоя. Коэффициенты c_i и d_i зависят только от H , k , модуля Юнга E и коэффици-

ента Пуассона σ используемого вещества. Зависимость n от плотности ρ находилась по формуле Лоренц Лорентца. Выражение (5) для ΔS^* задает спектральную чувствительность слоя к нагрузке с пространственной частотой k . При этом проведена оценка силы поверхностного трения, влияющего на изменение ΔS . Показано, что для пограничного слоя $\Delta S_F/\Delta S_P < 10^{-3}$, и трением можно пренебречь. Для изменения разности хода оптического пути от давления получено:

$$\Delta S(x) = P(x) \cdot K(k, H), \text{ где } K(k, H) = \Delta S^*(k, H)/P_0.$$

Для анализа решения удобнее использовать относительное изменение оптического пути, зависящее от безразмерной пространственной частоты kH :

$$\Delta s(kH) = \Delta S^*(k, H)/S_0 = \Delta S^*(k, H)/(2n_0H) = P_0 K(k, H)/(2n_0H) \quad (6)$$

На рис. 6 приведены графики $\Delta s(kH)/E$ для разных значений σ .

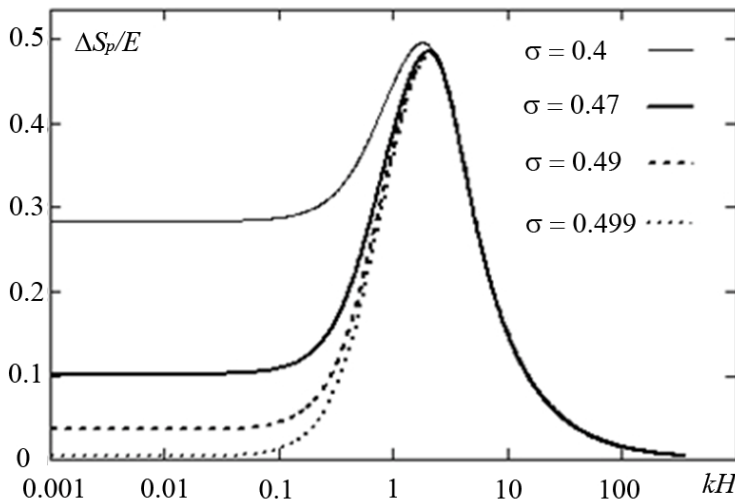


Рис. 6. Отклик упругого слоя на гармоническую нагрузку для различных значений σ при $E = 1$.

Из соотношения (6) видно, что $\Delta s(kH)$ с точностью до постоянного множителя совпадает с передаточной функцией $K(k, H)$ и зависит только от пространственной частоты и параметров материала. В результате, для гармонической нагрузки может быть решена обратная задача:

$$P(x) = \Delta S(x)/K(k, H). \quad (7)$$

Используя преобразование Фурье, для нагрузки $P(x, y)$ будем иметь

$$\Delta S(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[P(x, y)](\xi, \eta) \cdot K_H(\xi, \eta)\}(x, y), \quad (8)$$

где \mathcal{F} , \mathcal{F}^{-1} – операторы прямого и обратного преобразования Фурье, при этом $k = (\xi^2 + \eta^2)^{-1/2}$. Выражения (7), (8) описывают формирование отклика на заданную нагрузку. Используя выражение (8), можно найти передаточную функцию:

$$K_H(\xi, \eta) = \mathcal{F}[\Delta S(x, y)](\xi, \eta)/\mathcal{F}[P(x, y)](\xi, \eta). \quad (9)$$

Т. е. слой вещества может быть прокалиброван, и для известной передаточной функции по интерферограммам можно найти распределение давления:

$$P(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[\Delta S(x, y)](\xi, \eta)/K_H(\xi, \eta)\}(x, y). \quad (10)$$

Передаточная функция для известных E и σ может быть найдена по соотношению (6). Возможно ее определение и с помощью калибровок. Как показывает анализ решения, для этого достаточно знать ее значение всего в двух точках, в качестве которых удобно брать $K_H(0)$ и в максимуме при $kH \approx 2$. Отклик слоя на одностороннее сжатие в барокамере позволяет с высокой точностью определить значение $K_H(0)$. Для нахождения максимума необходимо опреде-

лить отклик слоя на известную нагрузку для пространственных частот вблизи $kH \approx 2$. В качестве известной нагрузки в работе при калибровках использовалось давление от ламинарной цилиндрической струи, ортогонально падающей на плоскую поверхность. Для подобных струй распределение давления может быть найдено по известным эмпирическим формулам [3], а также с помощью дренажных измерений.

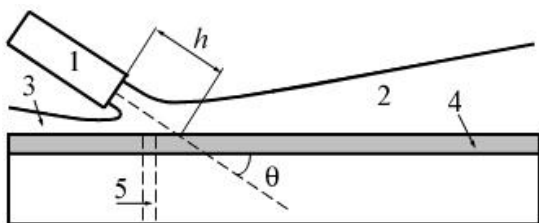


Рис. 7. Схема регистрации полей давления. 1 – трубка; 2 – ветвь струи с большим расходом; 3 – ветвь струи с малым расходом; 4 – датчик давления; 5 – дренажное отверстие.

В работе приводятся результаты экспериментов по регистрации давления от дозвуковой струи воздуха, набегающей под углом θ на плоскую поверхность (рис. 7). Отношение длины L трубки, из которой выдувается струя, к ее диаметру $L/d > 50$, что обеспечивает на выходе параболический профиль скорости. Вводятся безразмерные параметры $h^* = h/d$ – расстояние от оси выходного сечения трубки до стенки и $x^* = x/d$ – координата

вдоль поверхности от критической точки (максимума давления). Использовался датчик с $H = 4$ мм.

На рис. 8, а, б показаны интерферограммы, зарегистрированные в процессе эксперимента (поток слева). На рис. 8, в-д даны изображения с вычитанием базового кадра – визуализация в муаровых полосах. Современное оборудование позволяет проводить процедуру вычитания в реальном режиме времени и получать наглядную информацию о структуре течения в темпе эксперимента. В зоне контакта струи с поверхностью наблюдается максимум давления, далее по потоку – область возмущений. При увеличении давления растут поперечные размеры струи, возрастает давление в точке контакта и амплитуда возмущений. Подобные возмущения иначе называют псевдозвуковыми волнами. Они генерируются пульсирующей точкой контакта, и связанное с ними колебание давлений знакопеременно. При увеличении давления струя полностью переходит в нестационарный режим.

При угле $\theta = 90^\circ$ реализуется осесимметричная картина стационарного режима. Зависимость статического давления на поверхности от расстояния до оси $r^* = r/d$ можно описать эмпирическим законом [3]:

$$\Delta p(r^*)/\Delta p(0) = \exp(-c^2 r^{*2}) \quad (11)$$

где $c = 1.48h^{*-0.1}$ при $h^* \leq 6.2$ и $c = 5.4h^{*-0.75}$ при $h^* > 6.2$. Для найденной передаточной функции слоя, по соотношению (11) были просчитаны визуализации поля давления (рис. 9, а). Соответствующие им экспериментальные данные представлены на рис. 9, б. При повышении скорости струи возникают поперечные колебания, что приводит к появлению неустойчивости (рис. 9, в).

В настоящее время не существует панорамных методов, позволяющих в режиме реального времени проводить визуализацию полей давлений и пульса-

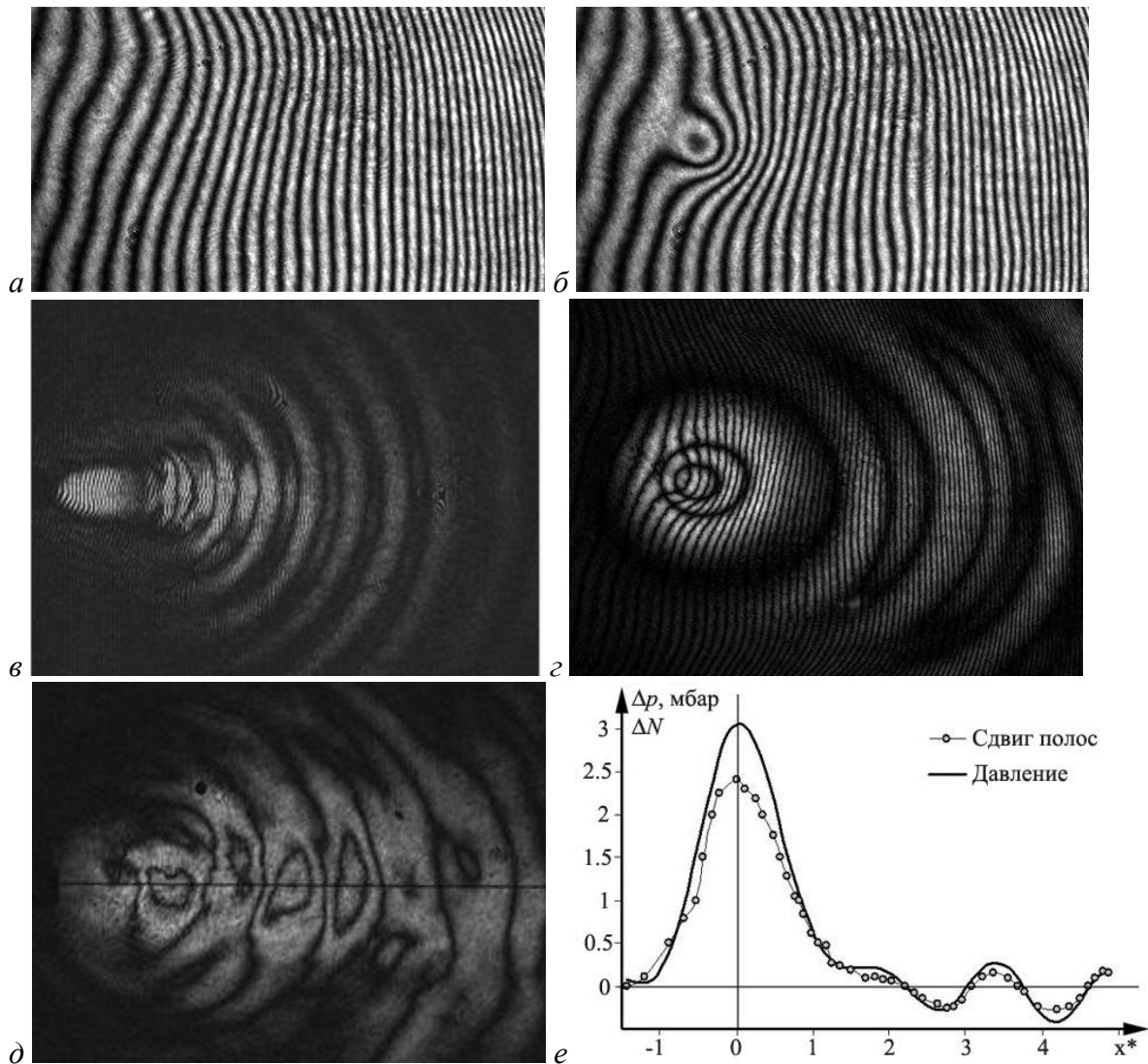


Рис. 8. Регистрации полей давления от струи. *a* – интерферограмма зарегистрированная без струи и *б* – со струей; *в-д* – визуализация полей давления в муаровых полосах от струи набегающей на поверхность: $\theta = 25^\circ$, $h^* = 2$ (*в*, *г*) и $\theta = 45^\circ$, $h^* = 5.2$ (*д*); *е* – графики ΔS и ΔP вдоль оси пристенного течения для струи (изображение *г*).

ций, характеризующихся малыми величинами порядка 1 мм. вод. ст. С помощью разработанного метода впервые удалось в процессе эксперимента визуализировать динамику потока на поверхности, создаваемого осесимметричными струями с различными конфигурациями падения на стенку.

Рассматриваемые датчики могут быть чувствительны одновременно и к давлению, и к тепловым потокам. На рис. 10. представлен пример визуализации теплового потока от струи воздуха, зарегистрированный датчиком давления. Спустя некоторое время струя была резко выключена, что позволило зарегистрировать интерферограммы, со сдвигом полос, связанным лишь с нагревом датчика. Четко регистрируется нулевая полоса, соответствующая $Q = 0$. Это говорит о наличии в данной области отрывной зоны. Таким образом, становится возможной регистрация сразу двух параметров: давления и тепловых потоков

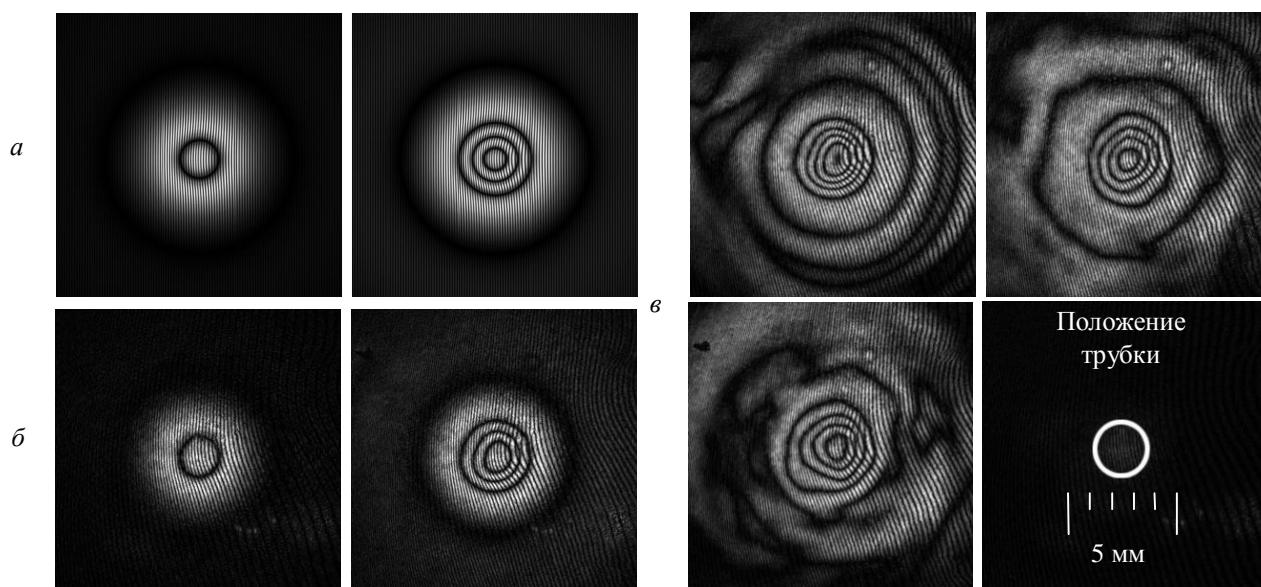


Рис. 9. Визуализация поля давления датчиком толщиной 4 мм от нормально падающей струи при постепенном увеличении скорости на срезе ($\varphi = 90^\circ$, $h^* = 4$): *a* – теоретический моделирование; *б* – экспериментальные данные; *в* – экспериментальные данные для нестационарного режима и положение среза трубки.

на одном датчике. В диссертации даны рекомендации по использованию одного покрытия для одновременной регистрации полей давления и тепловых потоков.

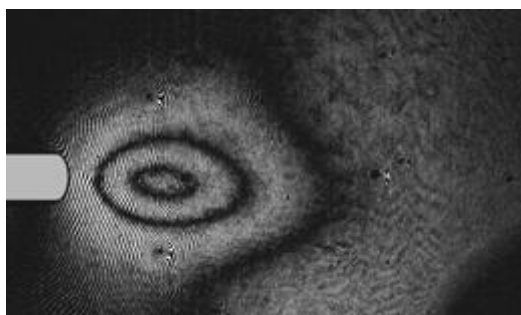


Рис. 10. Визуализация теплового потока.

Глава 3 посвящена реализации рассматриваемых методов с использованием диффузного света. Необходимость этого связана с тем, что в некоторых случаях реализация схем, работающих в зеркально отраженном свете, сопряжена с рядом трудностей. Рассматривается две группы факторов, ограничивающих их использование. К первой относятся ограничения, связанные с конструктивными особенностями аэрофизической установки и геометрическими параметрами исследуемой модели, а также с большой возможной кривизной исследуемой поверхности, когда невозможно зарегистрировать ее изображение в зеркально отраженном свете. В результате применение зеркальных схем ограничено плоскими или слабо искривленными поверхностями с ориентацией, обеспечивающей возможность регистрации отраженного излучения. Ко второй группе относятся случаи, когда невозможно создать оптически совершенное покрытие с поверхностями интерференционного качества. Для регистрации интерферограмм в регулярных или, по крайней мере, в криволинейных, но четко регистрируемых полосах, необходимо выполнение условия $\delta\Delta S_0 = 2n_0 \cdot \delta H < \lambda/4$. Здесь δH и $\delta\Delta S$ – локальные вариации толщины датчика H и оптического пути, связанные с шероховатостью поверхностей. Использование диффузного зондирующего излучения в некото-

рассматриваемых методов с использованием диффузного света. Необходимость этого связана с тем, что в некоторых случаях реализация схем, работающих в зеркально отраженном свете, сопряжена с рядом трудностей. Рассматривается две группы факторов, ограничивающих их использование. К первой относятся ограничения, связанные с конструктивными особенностями аэрофизической установки и геометрическими параметрами исследуемой модели, а также с большой возможной кривизной исследуемой поверхности, когда невозможно зарегистрировать ее изображение в зеркально отраженном свете. В результате применение зеркальных схем ограничено плоскими или слабо искривленными поверхностями с ориентацией, обеспечивающей возможность регистрации отраженного излучения. Ко второй группе относятся случаи, когда невозможно создать оптически совершенное покрытие с поверхностями интерференционного качества. Для регистрации интерферограмм в регулярных или, по крайней мере, в криволинейных, но четко регистрируемых полосах, необходимо выполнение условия $\delta\Delta S_0 = 2n_0 \cdot \delta H < \lambda/4$. Здесь δH и $\delta\Delta S$ – локальные вариации толщины датчика H и оптического пути, связанные с шероховатостью поверхностей. Использование диффузного зондирующего излучения в некото-

рых случаях позволяет обойти эти проблемы. При этом изображения модулированы спекл-структурой.

Нахождение среднестатистических геометрических характеристик спеклов является довольно сложной задачей. Однако для понимания основных принципов рассматриваемых в работе методов достаточно приближенных соотношений для их характерных размеров:

$$\delta \sim \lambda F / D = \lambda / \theta, \ell \sim \delta^2 / \lambda = \lambda (F / D)^2 = \lambda / \theta^2 = \delta / \theta.$$

где δ и ℓ – среднестатистический поперечный и продольный размеры спеклов соответственно, F – фокусное расстояние приемного объектива, D – диаметр зрачка объектива. Отношение $\theta = D^* = D/F$ – угловая апертура или относительное отверстие объектива D^* является в то же время угловым диапазоном регистрируемых пространственных частот.

Оптические методы с использованием регистрации изображений модулированных спекл структурой, претерпевающей изменения под действием исследуемого параметра, в настоящее время находят широкое применение в физическом эксперименте. В работе кратко рассматриваются основные принципы оптических методов с использованием спекл технологий. Все эти методы, с некоторым приближением, можно разделить на три основные группы.

Спекл-фотография. Позволяет регистрировать поперечное относительно направления регистрации смещение объекта. Широко используется при регистрации деформаций, полей скорости (PIV-методы), визуализации газовых потоков растровыми (фоновыми) теневыми методами и др. Возможна регистрация изображений в когерентном и в белом свете. В качестве аналога спеклов при этом выступают изображения присутствующих в потоке частиц, неоднородности структуры светорассеивающей поверхности, элементы раstra используемого для пространственной модуляции зондирующего пучка и т. п.

Корреляционная спекл-фотография. Предназначена для регистрации смещений, ортогональных исследуемой поверхности. В данной ситуации, с увеличением смещения происходят все более сильные изменения микроструктуры спеклограммы, что позволяет, используя алгоритмы на основе корреляционного анализа получать информацию о сдвигах.

Фазовая (корреляционная) спекл-интерферометрия.

В рассмотренных выше подходах, понятие оптической интерференции не используется, поэтому в современной литературе эти методы чаще называют методами спекл-фотографии. Однако известны методы, в которых описание изменения спекл-структуры невозможно без использования понятия интерференции. К ним относятся и методы, рассматриваемые в третьей главе диссертации.

Интерференционное соотношение (1) верно и для интерференции волн с хаотической пространственной модуляцией амплитуды и фазы (диффузные волны). При интерференции диффузных волн результирующая волна модулирована спеклами, размеры которых определяются спектром пространственных частот суммарной волны. Пусть в плоскости (x, y) интерферируют две волны с

комплексными амплитудами $A_{1,2}(x, y) = a_{1,2}(x, y)\exp[i\psi_{1,2}(x, y)]$. Интенсивность имеет вид

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\psi),$$

где $I_j = a_j a_j$, $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$. Если в ходе эксперимента пространственное распределение амплитуд a_1 и a_2 остается постоянным, а разность фаз волнами A_1 и A_2 меняется на $\Delta\phi = \Delta\phi[\chi(t)]$, где χ параметр характеризующий исследуемый процесс, то интерферограммы (спеклограммы) зарегистрированные с некоторым интервалом времени $\Delta t = t_2 - t_1$, можно представить в виде:

$$I_{t1} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\psi), \quad I_{t2} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\psi + \Delta\phi).$$

Из-за хаотичного распределения начальных фаз и амплитуд, невозможно визуально связать $\Delta\phi$ с изменением вида спеклограмм. Однако при соответствующей обработке, можно получить информацию о $\Delta\phi$, а значит и об изменении параметра ξ . Возможно применение различных алгоритмов обработки изображений. В основе одного из них лежит следующая процедура:

$$I^* = \langle (I_{t2} - I_{t1})^2 \rangle \sim 1 - \cos\Delta\phi. \quad (12)$$

В соотношении (12) угловые скобки означают усреднение по массиву спеклов в физически малой области (споте). При этом предполагается, что интенсивности интерферирующих волн I_1 и I_2 не претерпевают существенного изменения за время между регистрацией спеклограмм. Это условие сводится к малости изменения разности хода между волнами A_1 и A_2 по сравнению с продольными размерами спеклов, т. е. $\Delta\phi\lambda/(2\pi) \ll \ell$. Необходимость пространственного усреднения приводит к уменьшению пространственного разрешения и чувствительности метода. Как было показано в работе [5], для регулярных интерферограмм потенциальная точность определения сдвига полос может составлять $\Delta N = \Delta\phi/2\pi \approx 1/\pi K$, где K – количество градаций серости используемой телекамеры. При работе со спеклами точность определения сдвига интерференционных полос будет составлять $\Delta N = \Delta\phi/2\pi \approx 2/K$.

Схема регистрации интерферограмм в регулярных полосах с использованием диффузного освещения показана на рис. 11. Датчик 1, нанесенный на поверхность модели 2, освещается излучением от лазера 3 прошедшим через диффузор 4. Изображение поверхности, модулированное интерференционными полосами, объективом 5 фокусируется в приемной плоскости 6. В фокальной плоскости объектива расположена диафрагма 7 с радиусом отверстия R . Диффузную световую волну, отраженную от модели, можно представить набором плоских волн распространяющихся под различными углами. Для каждой отдельной волны будет наблюдаться интерференционная картина, вид которой описывается выражением, аналогичным соотношениям для зеркальной схемы. Результирующее

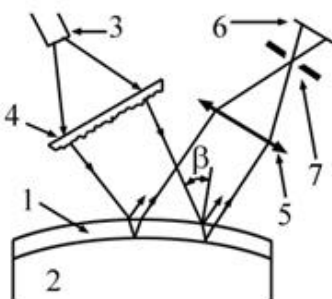


Рис. 11. Схема регистрации интерферограмм при диффузном освещении.

изображение будет являться суммой интерферограмм от отдельных плоских волн с волновыми векторами, лежащими внутри некоторого телесного угла $\Omega = \Delta\beta^2$, определяемого параметрами оптической схемы. Для тонких датчиков и малых изменений угла β эти картины практически совпадают, что позволяет наблюдать полосы равной толщины. В работе приведены материалы, позволяющие определить возможность регистрации интерферограмм в регулярных полосах с использованием диффузного освещения, в зависимости от геометрических параметров используемой схемы.

Иногда не удается нанести чувствительное покрытие с качеством поверхностей, позволяющим регистрировать интерферограммы в регулярных полосах. В этих случаях целесообразно изготавливать одну или обе поверхности датчика диффузно рассеивающими. Интерференционное соотношение (1) остается справедливым и в этом случае и позволяет проводить измерения. На рис. 12 представлены результаты визуализации давления от дозвуковой струи воздуха, распространяющейся вдоль поверхности датчика. Одна из поверхностей датчика (внутренняя) была рассеивающей, а другая отражающей. Давление в максимуме порядка 5 см вод. ст. Для изготовления датчика использовались вещества с большим (рис. 12, а) и малым (рис. 12, б) временами отклика. Алгоритм обработки спектрограмм основан на вычитании по модулю из рабочих изображений базового кадра, зафиксированного до включения исследуемого процесса.

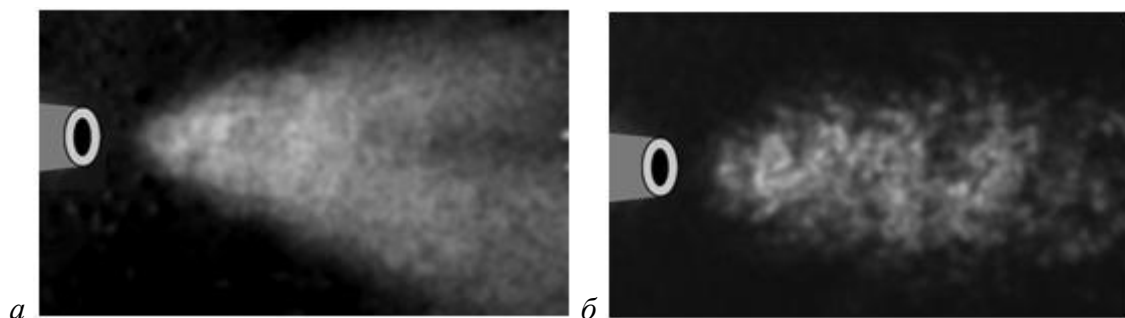


Рис. 12. Поле давления от струи, распространяющейся вдоль поверхности.
Давление в максимуме $\Delta P \approx 5$ см. вод. ст.

Для подтверждения возможности использования упругих покрытий при исследовании быстропротекающих процессов проведена визуализация ударной волны в ударной трубе. Перепад давления $\Delta P = 1.6$ атм, скорость фронта 450 м/с. На окно ударной трубы наносился датчик с диффузной поверхностью с $K(0) = 15$ см. вод. ст. Результаты визуализации показаны на рис. 13. Фронт волны четко локализуется. Здесь же представлены результаты обтекания цилиндра, установленного поперек канала. Отчетливо наблюдается изгиб фронта волны. Пространственное разрешение схемы не позволило определить величину скачка давления. По оценкам, сдвиг полос на скачке составляет $\Delta N \approx 100$. При тех же параметрах проводилась визуализация теньвым методом. С точностью до повторяемости параметров процесса положения волны, регистрируемые обоими методами, совпадают.

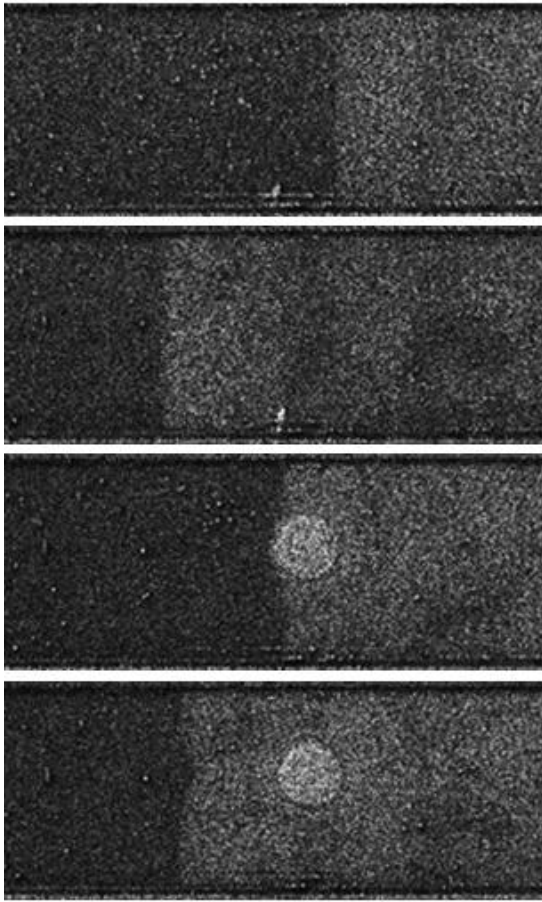


Рис. 13. Поле давлений на стенке ударной трубы.

В диссертации приводятся результаты регистрации радиационных потоков с использованием диффузного освещения, на примере визуализации изображения в инфракрасном (ИК) излучении изогнутого металлического стержня с приближенной температурой 250 °С. Изображение фокусировалось ИК-объективом на датчик тепловых потоков, нанесенный на подложку, изготовленную из кремния.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен общий подход применения методов оптической интерферометрии для панорамной регистрации полей давления и тепловых потоков на обтекаемых поверхностях. В качестве датчиков используются слои прозрачного вещества, изменяющие свои оптические свойства под воздействием регистрируемого параметра.

2. Отработана методика регистрации тепловых потоков. В приближении одномерности и линейности тепловой задачи получены соотношения, позволяющие по

интерферометрическим данным восстанавливать распределение непосредственно тепловых потоков на обтекаемых поверхностях. Метод успешно используется на установках ИТПМ СО РАН.

3. Отработана методика регистрации полей давления. В приближении линейности задачи упругости получены общие соотношения для отклика барочувствительного покрытия, позволяющие по интерферометрическим данным восстановить распределение давления на исследуемой поверхности. Потенциальные возможности метода позволяют регистрировать поля изменения давления на уровне $\Delta p < 0.1$ мм вод. ст., с быстродействием порядка 5 мкс, что недоступно с применением известных датчиков и методик.

4. Показана возможность применения разработанных методик на искривленных, произвольно ориентированных поверхностях с использованием интерференции в диффузном свете (фазовая спекл интерферометрия).

5. Получены экспериментальные результаты доказывающие перспективность разрабатываемых методик. В частности, впервые визуализировано поле давлений от дозвуковой струи ($Re < 1000$) набегающей на стенку под углом с изменением давления на уровне нескольких миллиметров водяного столба и поле давлений за ударной волной, распространяющейся в канале ударной трубы.

Цитируемая литература

1. Bolotin V.P., Cherkasskiy V.S. et all. Status of the Novosibirsk Free Electron Laser and First Experiments with High Power Terahertz Radiation // First International Conference on Submillimeter Science and Technology: Ahmedabad 2004. Physical Research Laboratory.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VII. Теория упругости: Учеб. пособие. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1987. – 248 с.
3. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности: Учеб. Для вузов. – М.: Физматлит, 2002. – 414 с.
4. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. – М.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
5. Pavlov A., Pavlov Al. A., Golubev M. P. Development of interferometry methods // 12th International Symposium on Flow Visualization (ISFV-12): Proc. Goettingen, 2006. CD Rom Proceedings, ISBN 0-9533991-8-4, ISFV-12-3.3. Paper 159:1-10 p.

Основные результаты работы представлены в публикациях:

1. Маслов Н. А., Бойко В. М., Голубев М. П., Павлов А. А., Павлов Ал. А., Поздняков Г. А. Оптические приборы: Учебное пособие – Новосиб. гос. ун-т, Новосибирск, 2008. 166 с.
2. Голубев М. П., Павлов А. А., Павлов Ал. А., Шиплюк А. Н. Оптический метод регистрации тепловых потоков // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, № 4. стр. 174-184.
3. Golubev M. P., Pavlov A. A., Pavlov Al. A. Use of phase spekle interferometry for pressure field registration // Int. Conference on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Part 1. Novosibirsk, 2008. p. 57-58.
4. Golubev M. P., Pavlov A. A., Pavlov Al. A. Panoramic optical method of heat-flow registration // 12th International Symposium on Flow Visualization (ISFV-12): Proc. Goettingen, 2006. CD Rom Proceedings, ISBN 0-9533991-8-4, ISFV-12-3.3. Paper 157:1-10 p.

Ответственный за выпуск М.П. Голубев

Подписано в печать 27.08.2009

Формат бумаги 60 × 84/16, Усл. печ. л. 1.0,
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 13

Отпечатано на ризографе ЗАО "ДОКСЕРВИС"
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1