

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.42

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РАЗМЕРОМ ДО 1000 мм

А. Ф. Белозеров

*ОАО «Научно-производственное объединение
"Государственный институт прикладной оптики"»,
420075, г. Казань, ул. Н. Липатова, 2
E-mail: progipo@tnpko.ru*

Базовые технологии, используемые в разработках теневых, интерференционных и интерференционно-теневых приборов первого и второго поколения, не позволили решить до конца ряд проблем современного газодинамического эксперимента, прежде всего создания сравнительно дешёвых и компактных систем для оптико-физических измерений газодинамических полей (полей визуализации) размером 800–1000 мм и более. В ближайшие годы следует ожидать резкого повышения спроса на уникальные оптические системы для оснащения аэродинамических труб и баллистических трасс: только на их основе возможно осуществить экспериментальное изучение картин обтекания моделей самолётов, вертолётных аппаратов будущего, автомобилей, ракет различных классов в условиях масштабирования, приближающихся к натурным. (В аэродинамической трубе поток газа направлен на неподвижную модель, например, летательного аппарата; аэробаллистическая трасса позволяет осуществлять прямое моделирование движения исследуемых тел.) Реализованы новые технические возможности оптических методов исследования газовых потоков: апостериорное изучение волновых полей, деформированных при прохождении через газовый поток, повышение чувствительности оптических измерений на 1–2 порядка, многократное увеличение объёма информации, получаемой в сложном газодинамическом эксперименте. Для решения этих проблем использованы современные оптические технологии.

Ключевые слова: оптические методы визуализации, интерференционные и теневые методы, методы светящейся точки, газовый поток, аэробаллистическая трасса, голографический интерферометр.

Введение. Изучение многих процессов в прозрачных неоднородных средах (воздух и составляющие его газы, жидкости, стекло и кристаллы), имеющих место в технике, в науке, в жизни, таких как смешивание компонентов в химической и топливной промышленности, растворов и лекарственных препаратов в медицине, тепломассообмен в теплотехнике, строительстве, гидромеханике, оптимизация параметров различных энергоустановок, существенно упрощается при их визуализации. Задача визуализации состоит в преобразовании фазы проходящей через прозрачную неоднородную среду световой волны в изменения интенсивности, которые легко регистрируются оптическими методами: теневыми, интерференционными, прямотеневыми (источник света расположен в бесконечности). Важнейшая особенность и достоинство этих методов состоят в высокой чувствительности, бесконтактности применения, поскольку они не вносят возмущений в изучаемый процесс [1].

Наиболее широкое и известное использование оптические методы получили в экспериментальной газовой динамике, потому что становление и развитие авиации, ракетной техники и космонавтики неразрывно связаны с необходимостью визуализации, измерений и контроля параметров газовых потоков. Здесь очень важно обеспечить проведение как качественных (форма и расположение скачков уплотнения, наблюдение вихрей, срыв-

ных течений, турбулентности, пограничного слоя), так и количественных исследований (расчёт полей плотности, температур, давлений).

Для количественных исследований потоков более пригодны интерференционные приборы. В СССР для этих целей были созданы интерферометры по схеме Цендера — Маха, наиболее известные из них ИЗК-454 (поле визуализации 230 мм) и ИТ-42 (поле визуализации 300 мм). Один из главных недостатков интерферометров — неустойчивость к внешним воздействиям: вибрациям, колебаниям температуры, звуковым колебаниям. Более простыми по конструкции и более устойчивыми являются теневые приборы ИАБ-451, ИАБ-453, ИАБ-457, ТЕ-19, ТЕ-20, ТЕ-21 с размером поля визуализации до 230 мм и ТЕ-23 с гигантским размером поля — в диаметре 500 мм! Разработанная к этому времени теория интерферометров со сдвигом волновых фронтов (в отличие от классических интерферометров здесь отсутствует эталонная ветвь прибора, что существенно упрощает и удешевляет его) дала возможность использовать теневые приборы в качестве интерферометров. Позднее в Казанском государственном университете был создан решёточный дифракционный интерферометр, а в Государственном оптическом институте (Ленинград) — различного типа зеркальные интерферометры [1], которые позволили реализовать значительную часть систем оптико-физических измерений (ОФИ) второго поколения. Ко второму поколению систем ОФИ можно отнести также неравноплечие лазерные интерферометры, квазицветные теневые приборы, теневые приборы, работающие по принципу «лазерного ножа», реализующие оптическое преобразование Гильберта [2], стереоскопические теневые приборы и другие, применяемые для количественных измерений.

У истоков создания интерференционных, теневых, прямотеневых методов и приборов были такие известные учёные, как Жюль Селестен Жамен, Альберт Абрахам Майкельсон, Эрнст Мах, Жан Бернар Фуко, Август Теплер.

Проблемные вопросы. В одном газодинамическом эксперименте (при одной продувке в аэродинамической трубе или одном выстреле на баллистической установке) обычно удаётся собрать ограниченную информацию об изучаемом потоке: теневые или интерференционные картины, или картины по методу светящейся точки. Эти картины получают к тому же при определённых параметрах настройки аппаратуры, оптимальных для визуализации какой-либо выбранной части потока: форме визуализирующей диафрагмы, ширине и ориентации осветительной щели, величине перекрытия изображения щели диафрагмой — при теневых измерениях; ширине и ориентации интерференционных полос, длине волны используемого излучения — при интерференционных измерениях. Таким образом, газодинамические исследования, особенно пространственных течений (показатель преломления потока газа — функция трёх координат), связаны с проведением большого количества экспериментов, для чего должна быть обеспечена достаточная стабильность газового потока в аэродинамической установке.

Выдвинут ряд принципиально новых требований к измерительной аппаратуре [1]. Одно из важнейших — повышение чувствительности измерений при изучении газовых потоков, которые вызывают деформацию прошедшего через них волнового фронта, не превышающую $\lambda/10$ (течения в аэродинамических трубах при низких давлениях, разреженные газовые потоки в ударных трубах, плазменные потоки).

К новым требованиям можно отнести необходимость исследования многофазных (чаще всего двухфазных: газ и твёрдые частицы) потоков обтекания тел на гиперзвуковых скоростях при эрозии поверхности тела.

Сложной задачей является оптическая диагностика через обычные защитные стёкла течений с сильным свечением и течений, имеющих сверхвысокие температуры. Возникает необходимость получения теневых или интерференционных картин при фокусировке светового пучка на узкую зону исследуемого течения, а также визуализации течения, находящегося за рассеивающей или фокусирующей свет прозрачной защитной стенкой.

Широкие возможности для изучения газодинамических течений, прежде всего для имитации условий полёта тел на больших высотах, исследования «следа» за летящим телом и нестационарного обтекания летящих тел, открывает баллистический эксперимент, поскольку в аэробаллистической трассе начальные параметры покоящегося газа, в котором движется модель летательного аппарата, могут поддерживаться и контролироваться с очень высокой точностью. Здесь полностью отсутствует «фон», накладываемый неоднородностью набегающего потока в аэродинамической трубе. На баллистической трассе более полно имитируются условия полёта тел сложной формы на меньших высотах, однако размер поля наблюдения приборов чаще всего не удовлетворяет исследователей.

Учитывая большую длину баллистических трасс (десятки и сотни метров), необходимость исследования неоднородностей в прозрачных средах при больших размерах поля наблюдения (до 1500–3000 мм), большое количество контрольной оптической аппаратуры по длине трассы (как правило, аппаратура устанавливается в нескольких десятках сечений по направлению полёта тела), возможность значительного (многие десятки сантиметров) изменения траектории модели во время полёта по трассе, высокую начальную скорость полёта (до десяти и более километров в секунду), большую стоимость каждого эксперимента (стоимость многократно возрастает, когда для достижения требуемых газодинамических параметров течения статическая температура изменяется от температуры глубокого холода (<100 К) до нескольких тысяч градусов, а вместо воздуха используются другие дорогостоящие газы — азот, углекислый газ, гелий), можно сказать, что баллистический эксперимент вбирает в себя квинтэссенцию всего ранее достигнутого в экспериментальной газовой динамике. Становятся необходимыми увеличение количества информации, получаемой в одном эксперименте, унификация используемой аппаратуры. Задачи ещё более усложняются при моделировании в полёте процессов «встречи» и взаимодействия летящего тела с преградой.

Цель данной работы — поиск новых технических решений для создания современных систем ОФИ.

История развития. Развитие в СССР авиационной и ракетной техники в 1950–1980-х годах стало возможным благодаря специально созданной инфраструктуре — десяткам новых газодинамических лабораторий, научно-исследовательских институтов и центров, в которых работали большие коллективы учёных и инженеров. Автор участвовал в работах совместно с крупными советскими учёными, внёсшим бесценный вклад в развитие теории и практики применения оптических методов и в создание соответствующей экспериментальной техники в нашей стране. К 1980-м годам в результате определённых успехов в разработке теории методов визуализации газовых потоков были созданы несколько десятков систем ОФИ для бесконтактного исследования газовых течений (рис. 1) в

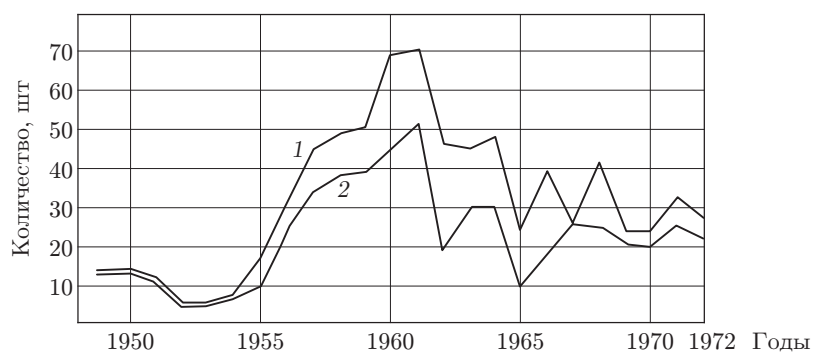


Рис. 1. Динамика выпуска теневого и интерференционных приборов в 1950–1970-х годах: кривая 1 — общий выпуск, кривая 2 — прибор ИАБ-451

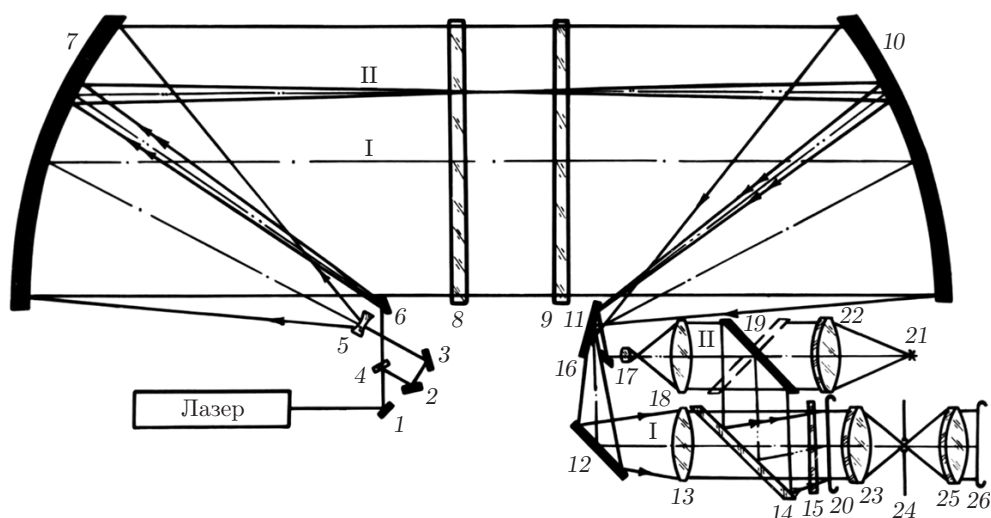


Рис. 2. Принципиальная схема голографического интерферометра ВЭ-667 с узким опорным пучком (I — объектный пучок; II — опорный пучок; 1–3, 6, 11, 12, 16, 19 — плоские зеркала; 4, 14 — полупрозрачные пластины; 7, 10 — сферические зеркала; 8, 9 — защитные стёкла; 5, 17, 18 — линзы; 13, 22, 23, 25 — объективы; 15 — фильтр; 20 — голограмма; 21 — лампа накаливания; 24 — диафрагма; 26 — фотокамера; элементы 14–19, 21–26 относятся к системе восстановления волн)

аэродинамических трубах и на баллистических установках. Используемые в них научно-технические решения не потеряли актуальности и в наши дни.

Появившиеся в середине 1960-х годов реальные возможности применения техники голографии позволили решить основные задачи, стоящие перед экспериментаторами, несколькими путями. Во-первых, восстановленное с голограммы без каких-либо искажений волновое поле может апостериорно изучаться. Использование этих методов имеет некоторые особенности вследствие двухступенчатости и других отличительных свойств голографического процесса [1]. Во-вторых, особенности методов голографической интерферометрии дают возможность снизить требования к качеству оптических систем (ОС) и элементов. Так, широко применяются голографические интерферометры с узким опорным пучком [2]. В этих интерферометрах опорная ветвь формируется оптическими элементами небольшого диаметра, изготовление которых не представляет трудностей (рис. 2); к тому же при формировании опорного пучка используются оптические элементы объектной ветви интерферометра, что значительно повышает его устойчивость в целом к внешним воздействиям. Пучки света при первом и втором экспонированиях регистрирующей среды проходят один и тот же оптический путь, практически не вызывая дополнительного смещения интерференционных полос.

Снижение технологических допусков оптических элементов. Интерференция волн, существующих в различных временных интервалах, апостериорность изучения восстановленных волн позволили, наконец, создать новый класс приборов и наметить пути решения ставшей к тому времени главной задачи создания сравнительно дешёвых и компактных систем ОФИ с размерами поля визуализации 800–1000 мм и более.

При применении двух встречных коллиматоров газовый поток просвечивается параллельным пучком излучения (схема в этом случае содержит два крупногабаритных объектива и два защитных стекла). При просвечивании потока сходящимся (расходящимся) пучком используются одно–два защитных стекла и один крупногабаритный объектив.

Одна из первых разработок с размером поля визуализации 600 мм — коинцидентный теневой прибор для баллистической установки — была реализована Государственным ин-

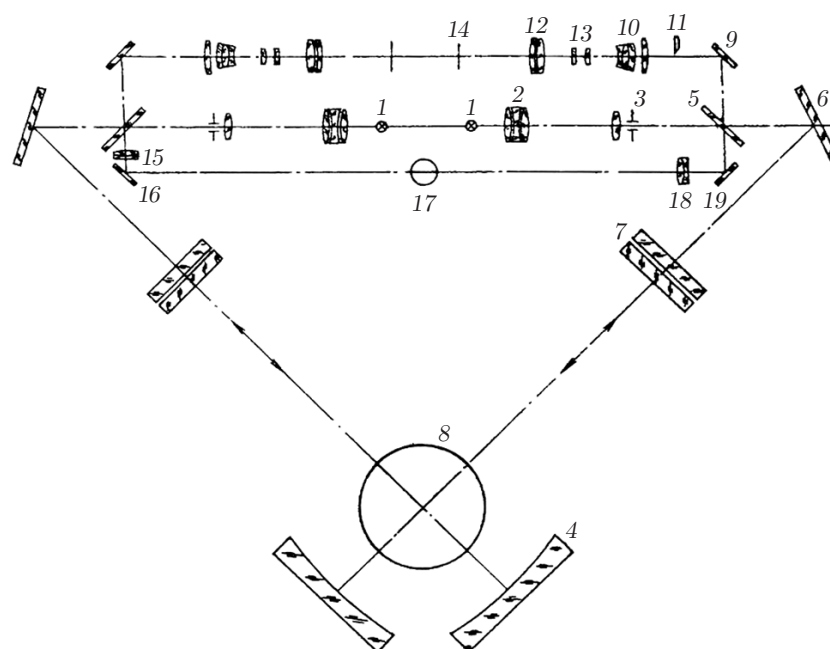


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема макетного образца сечения фоторегистрации (1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — диафрагма; 4 — сферические зеркала; 5 — полупрозрачная пластина; 6, 9, 16, 19 — плоские зеркала; 7 — защитные стёкла; 8 — рабочее поле визуализации; 10, 12 — объективы фотоаппаратов; 11 — визуализирующая диафрагма; 13 — измерительные марки; 14 — фотокассеты; 15, 18 — объективы; 17 — измерительный репер)

ституту прикладной оптики на экспериментальной базе Центрального аэрогидродинамического института им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ, г. Жуковский) ещё в конце 1960-х — начале 1970-х годов. Применялась схема специального теневого прибора [3] на основе оригинального сферического зеркала, изготовленного не по традиционной оптической технологии, а методом копирования по слою полиэфирной смолы, нанесённой на облегчённую металлическую подложку высокоточной поверхности выпуклого металлического пуансона диаметром 700 мм с радиусом кривизны 4722 мм (рис. 3). Авторам установки удалось удачно решить технологические вопросы и классифицировать зеркала нового типа по оптическим точностным правилам и условиям применения, введя несколько классов и категорий их качества. Внутри трассы на каждой измерительной станции располагаются только защитные стёкла и сферические зеркала.

К коинцидентной схеме относится голографическая установка ГУ-1 с просвечиванием потока расходящимся пучком лучей (рис. 4), она включает ветви для формирования объектного и опорного волновых полей и позволяет зафиксировать на голограмме наблюдаемый процесс, а затем апостериорно изучать его оптическими методами. Объектная ветвь — практически безаберрационная система. Универсальная установка ГУ-1 может работать и как самостоятельный теневой прибор или сдвиговый интерферометр (в этом случае необходимо использовать сферическое зеркало высокого качества). Радиус кривизны сферического зеркала для аэродинамических труб до 4–10 м.

Оптические системы опорной и объектной ветвей рассчитаны таким образом, что достигается равенство радиусов кривизны и размеров обоих пучков в плоскости голограммы. Кроме того, отсутствует взаимное оборачивание объектного и опорного волновых фронтов. Данное условие в сочетании с одинаковым коэффициентом увеличения в обеих ветвях (равенство диаметров световых пучков при отсутствии виньетирования) предполагает

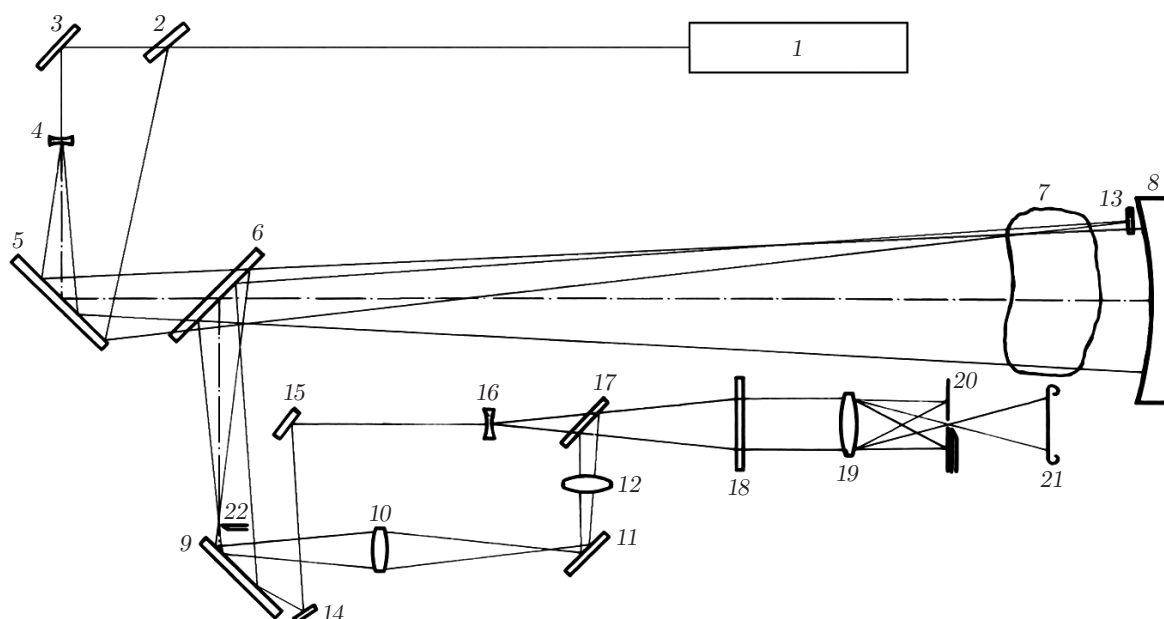


Рис. 4. Оптическая схема голографической установки ГУ-1 (1 — лазер; 2, 6, 17 — полупрозрачные пластины; 3, 5, 9, 11, 13–15 — плоские зеркала; 4 — отрицательная линза; 7 — исследуемое пространство; 8 — сферическое зеркало; 10, 12, 19 — объективы приёмной системы; 16 — отрицательная линза; 18 — голограмма; 20, 22 — ножи Фуко; 21 — плоскость фотоплёнки)

полное совпадение структур интерферирующих волновых фронтов, что является одной из основных предпосылок хорошего контраста интерференционных полос на голограмме. В подобных системах длина хода лучей в каждой из ветвей может достигать величины 10–20 м. Это, естественно, ужесточает требования к точности установки и креплению всех оптических элементов.

Для достижения хорошего контраста сдвиг волновых фронтов не должен превышать $1/4$ ширины интерференционной полосы. Пусть пространственная частота полос на голограмме $m = 100 \text{ мм}^{-1}$ (ширина полосы $e = 0,01 \text{ мм}$). Допустимое смещение одного из пучков в этом случае $1/4e = 0,0025 \text{ мм}$. Соответственно допустимый разворот сферического зеркала $\alpha = (1/4e)/(2R)$, что в нашем случае ($R = 3873 \text{ мм}$) составит около 1 угл. с.

С учётом того, что при увеличении размеров рабочего поля и настройке на полосы конечной ширины нельзя полностью пренебречь влиянием aberrаций оптической системы голографического интерферометра и качества входящих в него оптических элементов на качество интерференционной картины, разработаны голографические интерферометры с диаметром наблюдаемого поля 400–800 мм и параллельным ходом лучей в рабочей зоне [1, 4] для получения высококачественной системы с исправлением aberrаций до $5\text{--}10\lambda$: ИЗК-462 и ИЗК-463 (с афокальным компенсатором), ИГЦ-470 (с центральным экранированием пучка) (рис. 5).

Для восстановления волнового фронта при наличии дефектов крупногабаритной оптики разработан метод переноса информации о фазовом объекте на опорный пучок [1, 5, 6], из которого эту информацию сравнительно просто выделить. Суть метода заключается в получении голограммы при введённом фазовом объекте или без него и восстановлении исследуемого волнового поля объектным пучком. Качество оптики опорного пучка предполагается высоким. Используя этот способ, удаётся существенно уменьшить сферическую aberrацию и кому объектной волны в видимой области спектра, тем самым повысить точность теневых измерений, проводимых с помощью голографических теневого и цветного теневого методов.

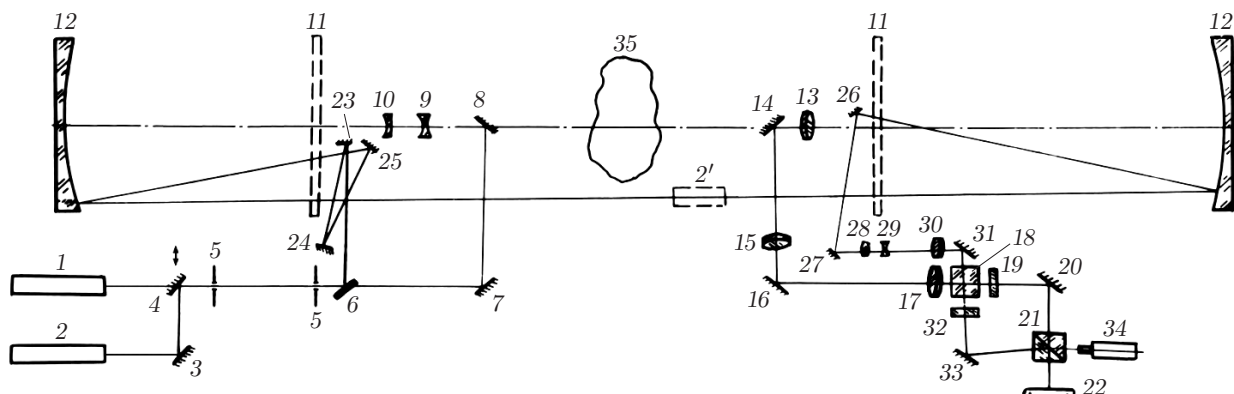


Рис. 5. Функциональная оптическая схема голографического интерферометра ИГЦ-470 с центральным экранированием пучка (1, 2, 2' — лазеры; 5 — диафрагмы; 6 — полупрозрачная пластина; 3, 4, 7, 8, 14, 16, 20, 23—27, 31, 33 — плоские зеркала; 9, 10, 28, 29 — конденсорные устройства; 11 — защитные стёкла; 12 — сферические зеркала со световым диаметром 460 мм, $R = 2992$ мм; 13, 30 — объективы; 15, 17 — оборачивающая система; 18 — стеклянный кубик; 19, 32 — светофильтры; 21 — светоделительный кубик; 22 — плоскость фотоплёнки; 34 — микроскоп; 35 — неоднородность)

При изучении восстановленного волнового поля оптическими методами осуществлена коррекция aberrаций ОС, используемой для получения голограммы [7]. Восстановление волнового поля проводится в направлении, противоположном ходу лучей, т. е. применяется принцип обращённого хода лучей через оптическую схему. В оптическую систему (рис. 6) направляется плоская волна с комплексной амплитудой

$$A = a(x, y) \exp(ikz), \quad (1)$$

где $a(x, y)$ — распределение амплитуды в плоскости XOY . Пройдя ОС, на голограмме Γ волна принимает вид

$$A_1 = a(x, y) \exp[ik[z + \Delta z(x', y')]]. \quad (2)$$

Здесь $\exp[ik\Delta z(x', y')] = \tau(x, y)$ — комплексный коэффициент пропускания оптической системы; $\Delta z(x', y')$ — величина, характеризующая искажение (деформацию) волны, вызванное aberrациями системы, дефектами оптических элементов, неточностью юстировки.

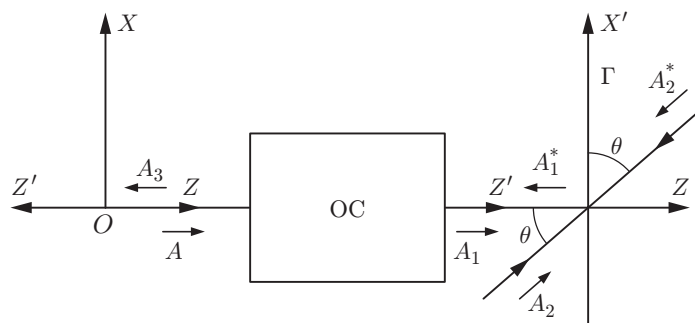


Рис. 6. Схема, поясняющая голографический принцип коррекции aberrаций ОС (ZZ' — оптическая ось)

Запись голограммы осуществляется по двухлучевой схеме Лейта с опорной волной

$$A_2 = a_2(x', y') \exp(ik\theta x). \quad (3)$$

Полученная таким образом голограмма устанавливается на прежнее место и просвечивается волной с амплитудой

$$A_2^* = a_2^*(x', y') \exp(-ik\theta x), \quad (4)$$

комплексно-сопряжённой с опорной (3). Через ОС в обратном направлении распространяется восстановленная волна, комплексно-сопряжённая с объектной (4):

$$A_1^* = a_1^*(x', y') \exp(-ik[z + \Delta z(x', y')]). \quad (5)$$

В этом случае распределение комплексной амплитуды в предметной плоскости будет следующим:

$$A_3^* = A_1^* \tau(x, y) = a_3^*(x, y) \exp(-ikz), \quad (6)$$

т. е. aberrации и дефекты оптической системы компенсируются.

В работах [1, 7, 8] проведены теоретические и экспериментальные исследования по оценке практических требований к корректирующей голограмме, которую обычно выполняют в виде фазовой, «отбелённой» (для повышения дифракционной эффективности). Смещение s голограммы сфокусированного изображения относительно первоначального её положения эквивалентно сдвигу α волновых полей, приведённому к рабочей зоне ОС:

$$a = sM, \quad (7)$$

где M — увеличение оптической системы.

Точность установки голограммы должна быть такой, чтобы обеспечивалось условие

$$\Delta z(x, y) - \Delta z(x - a_x, y - a_y) \leq 0,1\lambda, \quad (8)$$

т. е. погрешность измерений, вызванная неточной установкой голограммы, не должна превышать погрешность измерений интерференционного метода.

Из (7) и (8) видно, что чем меньше размер голограммы, тем точнее её нужно устанавливать для получения полной коррекции aberrаций. Контроль можно осуществлять по виду интерференционной картины, сформированной при исследовании восстановленного волнового поля. Уменьшая размер голограммы, оптимизируем погрешность, вызванную неоднородностью и дефектами подложки, до значений, которые можно не учитывать при проведении измерений, т. е. до уровня пороговой чувствительности измерений.

При освещении голограммы опорной комплексно-сопряжённой волной $A_r^* = a_r(x, y) \times \exp[ik\psi(x, y)]$ в +1-м порядке восстанавливается волна $A_o^*(x, y)$, комплексно-сопряжённая с объектной, которая описывается выражением

$$A_o(x, y) = a_o(x, y) \exp[ik[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)]]. \quad (9)$$

В этих выражениях $\psi(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ — фазовые распределения, вызываемые идеальной ОС, соответствующие опорной и объектной ветвям оптической системы; $\Delta\varphi(x, y)$ — приращение фазы, обусловленное aberrациями ОС, дефектами оптических элементов и юстировки.

Направив волну $A_0^*(x, y)$ в обратном ходе через оптическую систему, на выходе получим

$$A_0'^*(x, y) = a_0(x, y) \exp[ik\varphi(x, y)]. \quad (10)$$

В работе [1] рассмотрены и определены допуски на следующие параметры и величины при применении корригирующей голограммы: переэкспонирование, неравномерность освещённости по площади голограммы, форма световой волны, искажение регистрирующей среды (усадка фотоэмульсии), неоднородность материала подложки голограммы, смещение голограммы.

На основе использования теории отображающих свойств голограмм и проводящихся работ в области голограммной оптики [8–12] в Государственном институте прикладной оптики разработан унифицированный ряд интерференционных и теневых приборов нового класса на базе голограммных оптических элементов (ГОЭ) и синтезированных (компьютерных) голограммных оптических элементов (СГОЭ) для объективов коллиматоров системы ОФИ с диаметрами рабочего поля 230, 400, 800 мм и более и предельно высокими значениями относительного отверстия (от 1:3,5 до 1:2 и даже до 1:1)*.

Данная технология обеспечивает высокое оптическое качество, широкие корригирующие возможности, простоту и сравнительно невысокую стоимость изготовления и тиражирования СГОЭ (реализуются методы и средства фотолитографии, тиражирование осуществляется путём получения отпечатков рельефно-фазовой структуры ГОЭ — матрицы в слоях полиэфирной смолы холодного отверждения).

На рис. 7 представлены варианты схем объектной ветви интерференционно-теневого приборов (второго поколения), в которых СГОЭ являются либо основными объективами (a, b), либо компенсаторами ($c—e$). При построении приборов возможно также и комбинирование таких объективов, поскольку их абберационные характеристики имеют существенные отличия. С этой точки зрения в осветительной части интерферометра целесообразно использовать светосильные компактные варианты (см. рис. 7, $c—e$), а в приёмной — варианты, обеспечивающие лучшее качество изображения протяжённых объектов (см. рис. 7, a, b).

На рис. 8, a приведены частотные характеристики СГОЭ-объективов и голограммно-линзовых объективов диаметром 230 мм, в которых СГОЭ выступают как компенсаторы сферической абберации. Видно, что максимальная частота голограмм-компенсаторов (кривая 1) для объективов с относительным отверстием 1:3 и 1:2,5 не превышает 20 мм^{-1} , в то время как для голограмм-объективов она существенно больше. Расчёт выполнен для $\lambda = 694 \text{ нм}$. Аналогичные кривые для объективов диаметрами 400 и 800 мм приведены на рис. 8, b, c . Проведены расчёты голограммно-линзовых объективов (кривая 2) диаметрами 230, 400, 800 мм при использовании компенсатора диаметром 100 мм. Определены допуски на смещение голограмм-компенсаторов диаметрами 100 и 200 мм. Для компенсатора диаметром 100 мм они не превышают 0,001 мм.

Результаты расчётов показали, что наиболее технологичными являются такие схемы объективов, в которых линза расположена плоской поверхностью к пучку, а голограммный компенсатор имеет световой диаметр около 200 мм. При таком построении схемы максимальная частота штрихов не превышает 30 мм^{-1} для всех рассчитанных полей визуализации и относительного отверстия 1:3.

Имеющееся технологическое оборудование обеспечивает изготовление рельефно-фазовых ГОЭ высокого оптического качества со световым диаметром до 230 мм и наибольшей

*Принятые для объективов коллиматоров систем ОФИ первого и второго поколения значения величины относительного отверстия от 1:10 до 1:8 привели бы к созданию оптических комплексов, неприемлемых для эксплуатации (по габаритам и массе) в газодинамических лабораториях.

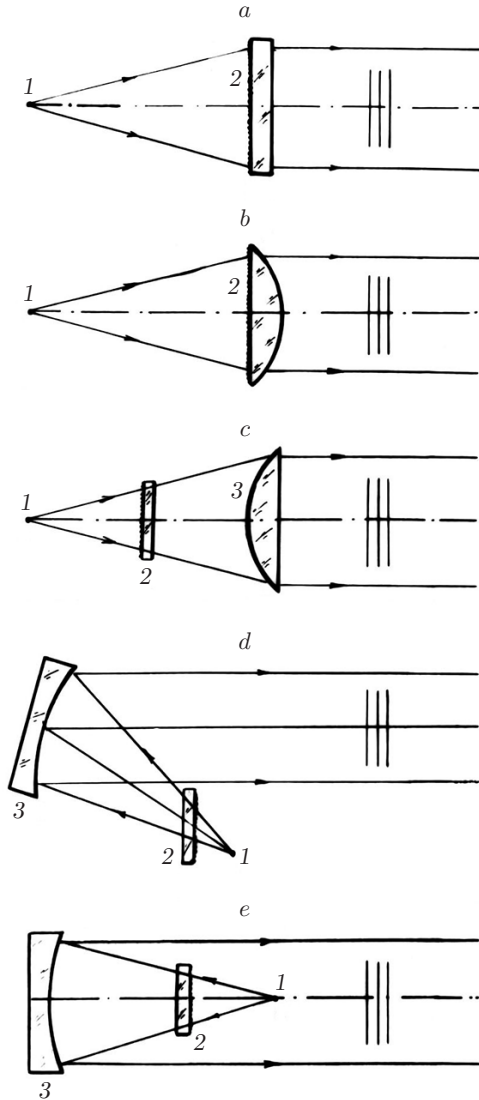


Рис. 7. Варианты оптических систем объективной ветви интерференционно-теневых приборов с использованием синтезированных голограммных оптических элементов: *a, b* — в качестве основного объектива, *c—e* — в качестве компенсатора (*1* — источник света, *2* — СГОЭ, *3* — оптический элемент)

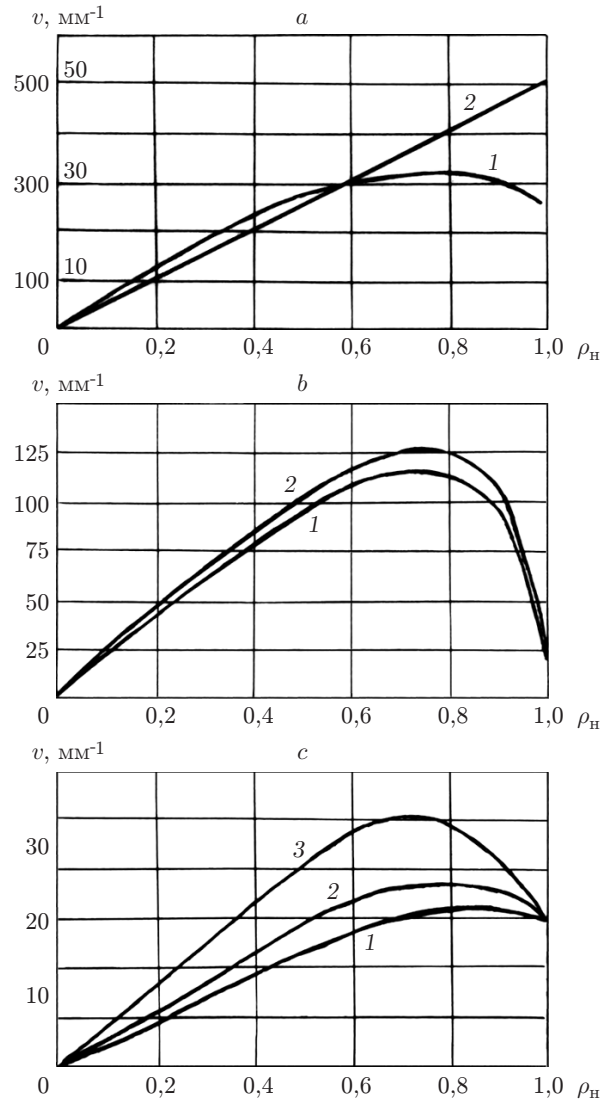


Рис. 8. Частотные характеристики СГОЭ для различных диаметров световых полей: *a* — для системы на рис. 7, *a, b* (световой диаметр 230 мм, кривая *1* — $0 \dots 50 \text{ мм}^{-1}$, *2* — $0 \dots 500 \text{ мм}^{-1}$); *b* — для системы на рис. 7, *c* (кривая *1* — световой диаметр 230 мм, диаметр голограммы 140 мм, *2* — световой диаметр 400 мм, диаметр голограммы 220 мм); *c* — для системы на рис. 7, *d* (кривые *1, 2, 3* — световые диаметры 230, 400, 800 мм); *v* — пространственная частота, ρ_n — нормированный радиус голограмм

пространственной частотой до 200 мм^{-1} (в перспективе возможно использование прецизионного устройства для синтеза голограмм, которое позволит получить ГОЭ диаметром до 500 мм и пространственной частотой до 1500 мм^{-1}).

Изготовление многоуровневых (по глубине травления материала «нарезаны» штрихи) СГОЭ, обладающих высокой дифракционной эффективностью (до 90% и выше) и пониженным уровнем фона, возможно при малых частотах (не превышающих 30 мм^{-1}). Поэтому при создании интерференционных приборов этого класса более приемлемы двухкомпонентные ОС, состоящие из линзового объектива и соответственно рассчитанного голограммного корректора.

Высокая компактность оптических систем таких приборов позволяет существенно сократить производственные площади, необходимые для их размещения. В отдельных случаях оказывается возможным совместить в объективах приборов две функции: оптические элементы и защитные стёкла, при этом рельефно-фазовая структура ГОЭ может быть нанесена непосредственно на защитные стёкла газодинамических установок.

На рис. 9 показаны функциональные схемы интерферометров на основе двух встречно установленных коллиматоров (с голограммно-линзовыми и голограммными объектива-

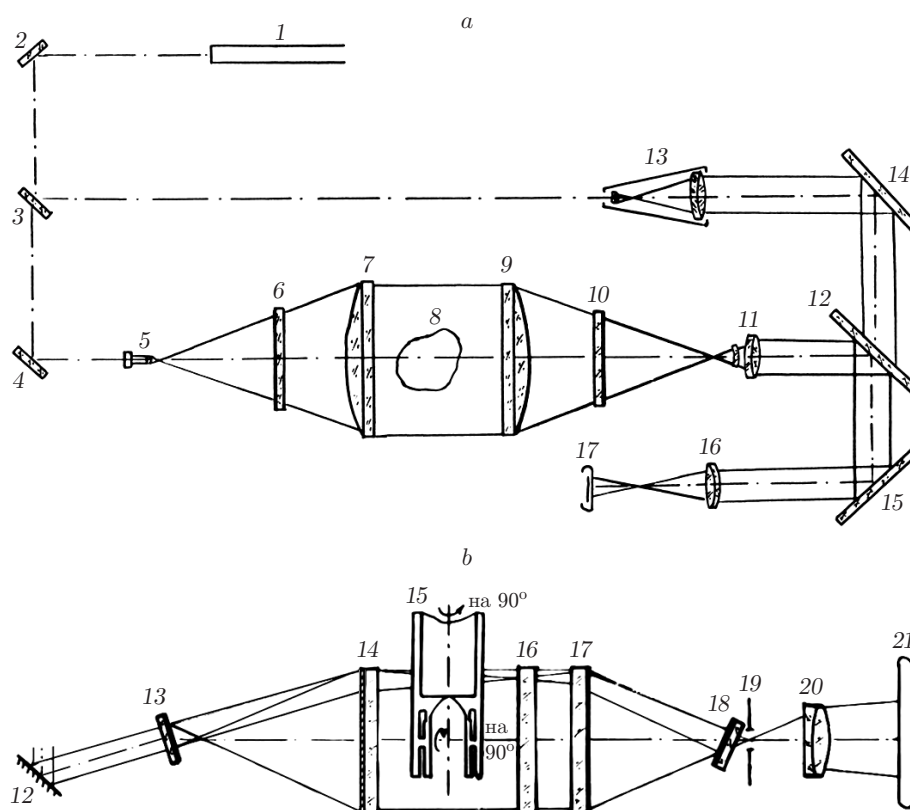


Рис. 9. Функциональные оптические схемы интерферометра: *a* — на основе голограммно-линзовых объективов диаметром 400 мм (1 — лазер; 2, 4, 14, 15 — зеркала; 3, 12 — светоделители; 5 — микрообъектив; 6, 10 — голограммные компенсаторы; 7, 9 — плоско-выпуклые линзы диаметром 400 мм ; 8 — фазовый объект; 11, 16 — объективы; 13 — телескопическая система; 17 — регистрирующая среда); *b* — на основе четырёх осевых голограммных линз (12 — плоское зеркало; 13, 18 — ГОЭ; 14, 17 — ГОЭ-объективы; 15 — сопловый блок ударной аэродинамической трубы; 16 — защитное стекло; 19 — диафрагма; 20 — объектив; 21 — регистрирующая среда)

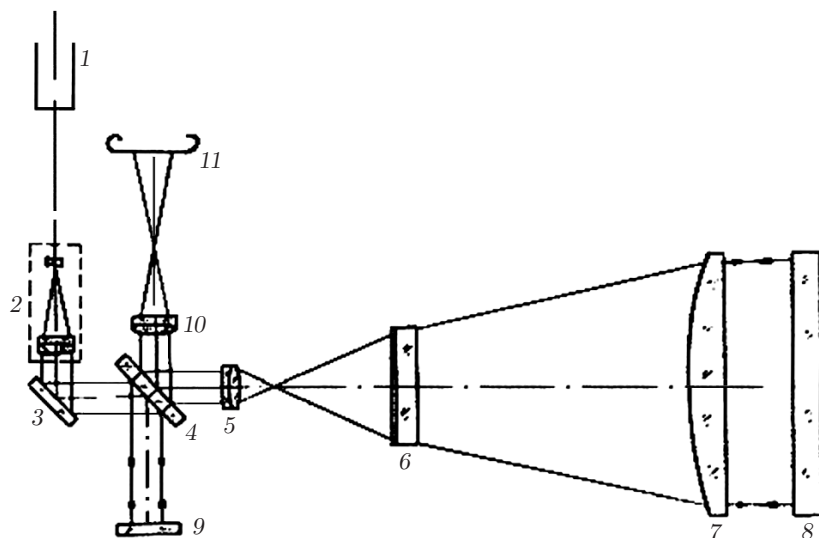


Рис. 10. Интерферометр Тваймана — Грина на основе голограммного компенсатора: 1 — лазер; 2 — коллиматор; 3, 9 — зеркала; 4 — светоделитель; 5, 10 — объективы; 6 — голограммный компенсатор; 7 — плосковыпуклая линза; 8 — плоское зеркало; 11 — фотоплёнка

ми) с использованием узкого опорного пучка. Размер поля визуализации интерферометров 400 мм. Каждый объектив коллиматора состоит из плосковыпуклой линзы (световой диаметр 400 мм) и синтезированной голограммы (световой диаметр 200 мм) (рис. 9, а). В схему рис. 9, б входят четыре осевые синтезированные голограммные линзы.

Следует отметить, что образцы интерферометров для аэродинамических труб на основе голограммных объективов и голограммных корректоров с полем визуализации 400 мм были созданы впервые в мировой практике.

На рис. 10 показан образец интерферометра Тваймана — Грина с голограммно-линзовым объективом с полем визуализации диаметром 800 мм, объектная ветвь включает в себя плосковыпуклую линзу 7 (световой диаметр 800 мм, $R = 1506,6$ мм), плоское зеркало 8 и голограммный компенсатор 6 (световой диаметр 200 мм). Остаточная волновая aberrация объектной ветви прибора $\sim(1-2\lambda)$.

Рассчитан, изготовлен и испытан зеркальный объектив с отражательной голограммой в качестве компенсатора (световой диаметр 250 мм, относительное отверстие 1 : 1,4). Такая величина относительного отверстия даёт надежду разработать компактный интерферометр с размером наблюдаемого поля 1000–1500 мм. Дальнейшее увеличение наблюдаемого поля систем ОФИ до 1500–2000 мм возможно на основе адаптивной оптики. Проведены исследования, закончившиеся созданием макета теневого прибора (использовалось многокомпонентное плоское зеркало и зеркальный объектив по схеме Кассегрена, в качестве параболического — прожекторное зеркало) [13].

Дифракционная эффективность голограмм, зарегистрированных во встречных пучках, теоретически может достигать 100 %. Известно [14], что голограмма, полученная во встречных пучках с осевым сферическим и внеосевым плоским волновыми фронтами, обладает теми же свойствами, что и внеосевое параболическое зеркало. Теневая система (рис. 11), образованная с помощью таких зеркал, может применяться в газодинамических экспериментах.

Интересные возможности газодинамического эксперимента продемонстрированы [1] с помощью голографического варианта метода «острой фокусировки»: с использованием

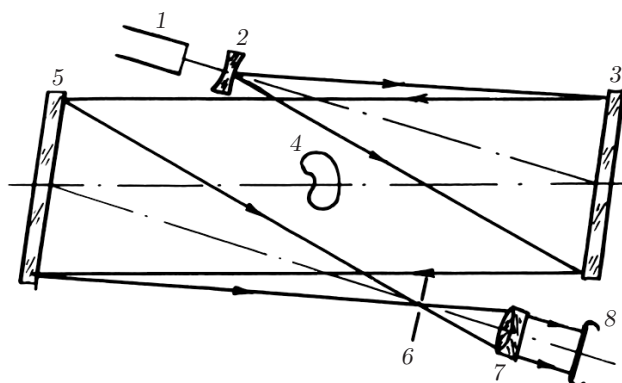


Рис. 11. Теневая система, образованная с помощью голограммных зеркал (1 — лазер; 2 — линза; 3, 5 — основные объективы — голограммные оптические элементы; 4 — фазовый объект; 6 — визуализирующая диафрагма; 7 — объектив; 8 — регистрирующая среда)

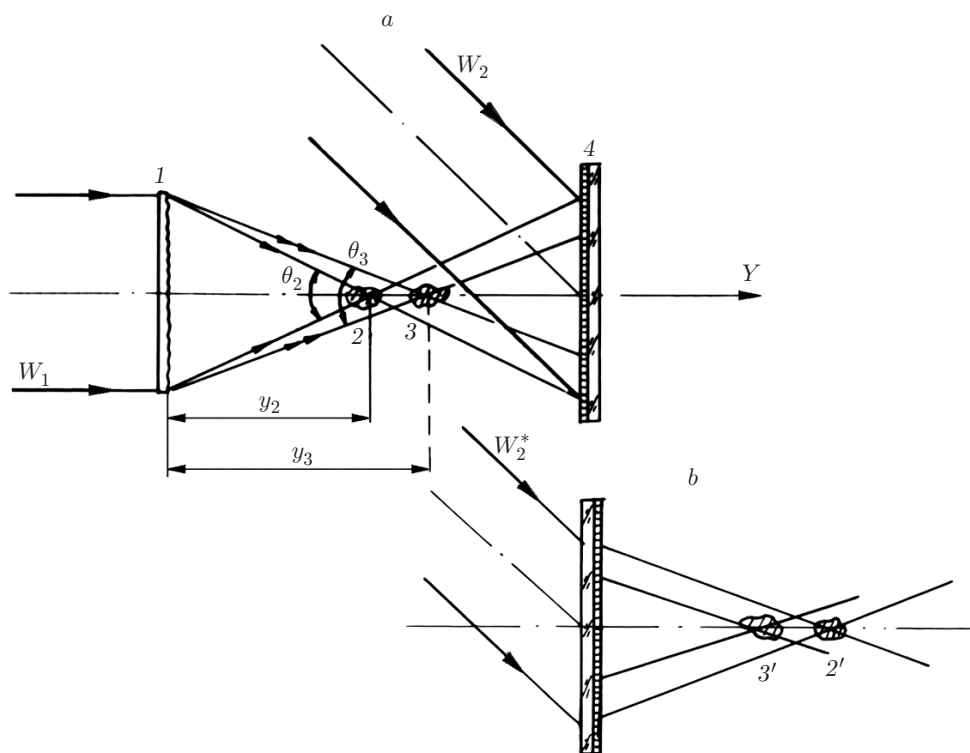


Рис. 12. Голографический метод «острой фокусировки»: *a* — схема записи голограммы двух сечений трёхмерного газового потока; *b* — схема восстановления волновых полей в двух сечениях потока (1 — рассеиватель; 2, 2', 3, 3' — фазовые объекты; 4 — фотопластинка)

специального рассеивателя добиваются просвечивания фазового объекта набором элементарных пучков, образующих апертурный угол, а при восстановлении волновых полей, регулируя угловую апертуру регистрируемого пучка лучей, получают резкое изображение только части поля визуализации в направлении оптической оси (рис. 12).

На рис. 13 приведены фотографии теневых картин течения около летящих шаров, полученные с одной голограммы в аэробаллистической трассе Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург).

Одним из возможных практических приложений метода острой фокусировки могут служить исследования в аэродинамических трубах и плазменных установках, когда необходимо исключить влияние защитных стёкол, подверженных значительному нагреву. Применение этого метода позволит существенно уменьшить требования к качеству защитных стёкол, что особенно важно при создании систем ОФИ с большими размерами поля визуализации.

Разработанные приборы дают возможность повысить чувствительность теневых и интерференционных измерений [1–13]. Увеличение чувствительности на 1–2 порядка достигается применением нелинейной записи голограмм при многократном просвечивании потока газа или плазмы; для повышения чувствительности на 2 порядка используются методы трёх- и многолучевой интерферометрии; реализован также метод «добавок»: в поток газа или плазмы добавляются частицы вещества (доли процента от массы основного газа), а просвечивание потока производится лазерным источником света на длине волны, близкой к линии поглощения вещества-добавки в газовом состоянии или в виде пара. В эксперименте достигнут рост чувствительности измерений в 70 раз [1] при использовании паров стронция в качестве вещества-добавки. Метод добавок — одна из практических реализаций метода аномальной дисперсии Д. С. Рождественского.

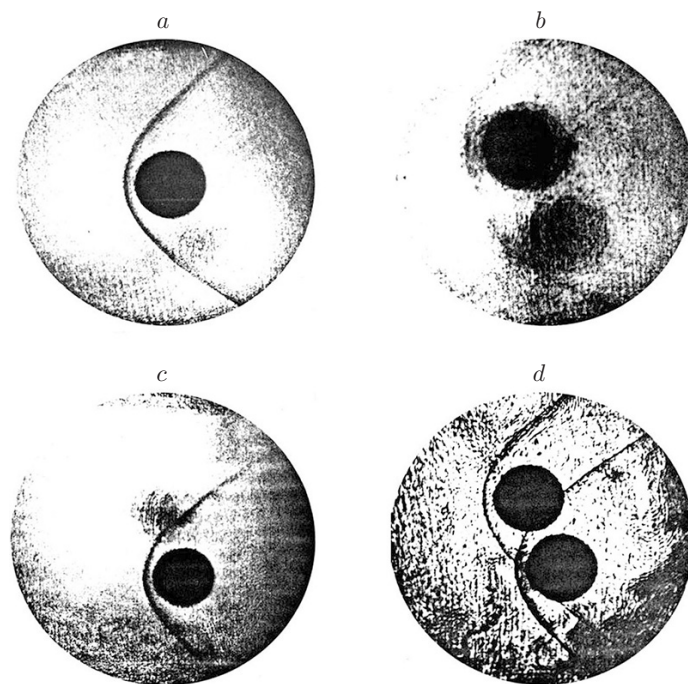


Рис. 13. Теневые картины течения около двух различных летящих шаров, полученные с одной голограммы на баллистической трассе путём фокусировки: *a* — на модель, расположенную на большем расстоянии от голограммы; *b* — на плоскость между моделями; *c* — на ближнюю к голограмме модель (расстояние между центрами летящих моделей 35 мм); *d* — обычным способом

Заключение. В данной работе рассмотрены пути создания систем оптико-физических измерений для оснащения газодинамических стендов и установок с размером поля визуализации до 1000 мм и более. Результаты исследований учтены при разработке рекомендаций по оснащению системами ОФИ новых аэродинамических труб ЦАГИ и Центрального научно-исследовательского института машиностроения (г. Королёв).

Оптическую систему с параллельным ходом лучей в исследуемой зоне целесообразно создавать на базе зеркальных объективов с относительным отверстием до 1:4. В этом случае может быть проведена многоступенчатая коррекция ОС: вначале с помощью афокального компенсатора (коррекция общих ошибок), затем голографическими методами. Системы ОФИ четвёртого поколения для перспективных аэродинамических труб и баллистических установок должны быть укомплектованы техникой управления процессом автоматизированного проведения экспериментов и получения экспериментальных данных и параметров газового потока с широким применением микроэлектроники, оптических межсоединений и коммутаторов, волоконно-оптических линий связи, мульти- и демультимплексоров, достижений в лазерной технике, нелинейной оптике и голографии [15].

Предлагаемые технические решения обоснованы теоретически и частично апробированы. Несмотря на развитие численных методов расчёта газодинамических течений всех видов интерес к экспериментальной итоговой оценке при визуализации потоков сохранится ещё долго.

Автор выражает благодарность ведущим специалистам лаборатории приборов для исследования неоднородных прозрачных сред д-ру техн. наук А. В. Лукину, канд. техн. наук А. К. Бекетовой, канд. техн. наук Л. Т. Мустафиной, внёсшим определяющий вклад в разработку технических, методических и ряда технологических проблем при создании крупногабаритных систем ОФИ и их испытаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белозеров А. Ф.** Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань: Изд-во Казанского гос. техн. ун-та, 2007. 747 с.
2. **Belozerov A. F., Kouzilin J. E.** The holographic interferometer on the basis of the spherical mirrors. Application de l'holographie // *Comp. Rendus du Symposium International*. Besancon, France, 1970.
3. **Бекетова А. К., Дементьев И. М.** Теневые методы визуализации и регистрации движения объектов на баллистических установках // *Оптические методы исследований в баллистическом эксперименте*. Л.: Наука, 1979. С. 16–31.
4. **Бекетова А. К., Белозеров А. Ф., Березкин А. Н. и др.** Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
5. **Meier R. W.** Magnification and third-order aberration in holographie // *JOSA*. 1965. **55**, N 8. P. 987–992.
6. **Upatnieks J., Vander Lugt A., Leith E.** Correction of lens aberrations by means of holograms // *Appl. Opt.* 1966. **5**, N 4. P. 589–593.
7. **Белозеров А. Ф., Махмутов Э. Г., Спорник Н. М.** О коррекции aberrаций оптических систем теневых и интерференционных приборов с помощью голограммы // *Проблемы голографии*. 1973. Вып. 3. С. 46–49.
8. **Мустафин К. С.** Исследование отображающих свойств голограмм и возможностей их применения в оптическом приборостроении: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук /ГОИ им. С. И. Вавилова. Л., 1975. 24 с.
9. **Close D. H.** Holographic optical elements // *Opt. Eng.* 1975. **14**, N 5. P. 408–419.

10. **Лукин А. В.** Синтезированные голограммы и их применение в оптическом приборостроении // Оптическая запись и обработка информации. Куйбышев: Изд-во Куйбышевского авиационного института, 1986. С. 5–16.
11. **Агачев А. Р., Ларионов Н. П., Лукин А. В. и др.** Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. № 12. С. 23–32.
12. **Кольер Р., Беркхардт К., Лин Л.** Оптическая голография. М.: Мир, 1973. С. 58–62.
13. **Мустафина Л. Т.** Исследования и разработка голографических методов и систем для изучения газовых потоков низкой плотности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук /ЛГУ. Л., 1983.
14. **Салех Б., Тейх М.** Оптика и фотоника. Принципы и применения: Учеб. пособие. Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2012. Т. 1. 784 с.; Т. 2. 784 с.
15. **Розанов Н. Н., Стаселько Д. И.** Полвека новой оптики в России: лазеры, нелинейная оптика и оптическая голография // Лазер-Информ. 2011. № 23(470).

Поступила в редакцию 14 января 2014 г.
