

УДК 535.4 + 535.8

А.Ф. Белозёров, А.В. Лукин

*Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики» (ОАО «НПО ГИПО»), Россия
420075, Казань, Н. Липатова ул., 2, E-mail: progipo@nprko.ru*

**СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ
ПОЛЕЙ РАЗМЕРОМ ДО 1000 мм НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАММНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

АННОТАЦИЯ

Показаны технические возможности решения важной проблемы экспериментальной газодинамики – создания продуктового ряда систем оптико-физических исследований (ОФИ) – теневых и интерференционных приборов для визуализации газовых потоков в аэродинамических трубах и баллистических трассах в рабочем поле размером до 1000 мм. Для создания объективов коллиматоров систем ОФИ диаметром 400-1000 мм и относительным отверстием до 1:2 использована дифракционная оптика – синтезированные голограммные оптические элементы (СГОЭ). Созданная уникальная аппаратура экспериментально апробирована.

**НЕОДНОРОДНОСТИ В ПРОЗРАЧНЫХ СРЕДАХ, ТРЕХМЕРНЫЙ ГАЗОВЫЙ ПОТОК,
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ТЕНЕВЫЕ МЕТОДЫ, МЕТОДЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ, ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ,
СИНТЕЗИРОВАННЫЙ ГОЛОГРАММНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ, ОБЪЕКТИВ
КОЛЛИМАТОРА, «ОСТРАЯ» ФОКУСИРОВКА**

ВВЕДЕНИЕ

Технологии, положенные в основу разработок теневых, интерференционных и интерференционно-теневых приборов 1-го и 2-го поколений, не решили до конца проблему создания сравнительно дешевых и компактных систем для оптико-физических исследований с размерами рабочего поля (поля визуализации) 800-1000 мм и более. Необходимость оснащения современных аэродинамических и баллистических установок такими уникальными системами объективно существует, поскольку только на их основе возможно экспериментальное изучение обтекания моделей самолётов, вертолётных аппаратов будущего, автомобилей, ракет различного назначения в условиях, приближающихся к натурным [1].

На основе использования теории отображающих свойств голограмм и элементов голограммной оптики [2-6] авторами разработан унифицированный ряд интерференционных и теневых приборов нового класса – на основе голограммных оптических элементов (ГОЭ) и синтезированных (компьютерных) голограммных оптических элементов для объективов коллима-

торов системы ОФИ – с диаметром 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 корректирующие 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. 1 представлены основные варианты принципиальных схемных решений объектной ветви интерференционно-теневого прибора, в которых СГОЭ используются либо в качестве основных объективов (а,б), либо компенсаторов (в,г,д). При построении приборов возможно также и комбинированное применение таких объективов, поскольку их абберационные характеристики имеют существенные отличия. С этой точки зрения, в осветительной части интерферометра целесообразно использовать светосильные компактные варианты (рис. 1в,г,д), а в приёмной – варианты, обеспечивающие лучшее качество изображения протяженных объектов (рис. 1а,б).

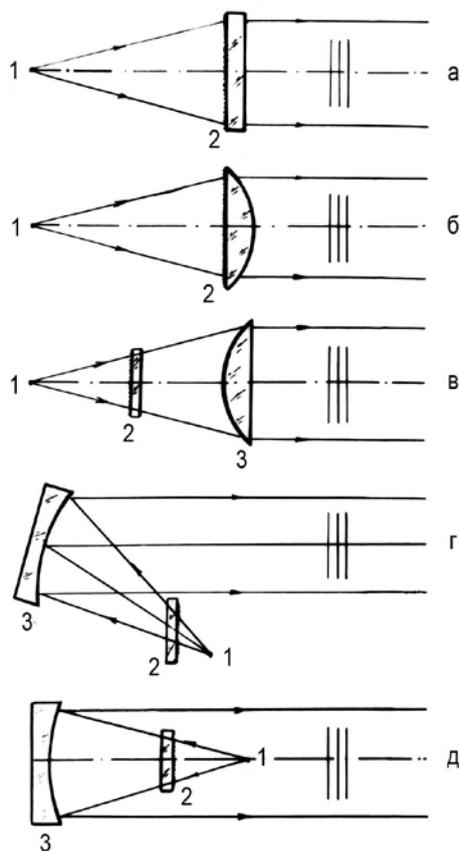


Рис. 1. Основные варианты оптических систем объектной ветви интерференционно-теневого прибора: 1 – источник света; 2 – СГОЭ; 3 – оптический элемент

На рис. 2а приведены частотные характеристики СГОЭ – объективов и голограммно-линзовых объективов диаметром 230 мм, в которых СГОЭ используются в качестве компенсаторов сферической абберации. Видно, что максимальная частота голограмм – компенсаторов для объективов с относительным отверстием 1:3 и 1:2 не превышает 20 мм^{-1} , в то время как для голограмм – объективов она существенно больше. Расчет выполнен для $\lambda = 694 \text{ нм}$.

*) Принятые для объективов коллиматоров систем ОФИ 1-го и 2-го поколений значения от 1:10 до 1:8 привели бы к созданию неприемлемых для эксплуатации (по габаритам и массе) в газодинамических лабораториях оптических комплексов.

Аналогичные кривые для объективов диаметром 400 и 800 мм приведены на рис. 2б,в. Рассмотрены два положения линзового объектива относительно компенсатора: в первом случае выпуклой стороной к компенсатору, во втором – плоской. Проведены расчёты голограммно-линзовых объективов диаметром 230 мм, 400 мм, 800 мм при использовании компенсатора диаметром 100 мм. Определены допуски на смещение голограммы – компенсатора диаметром 100 мм 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.

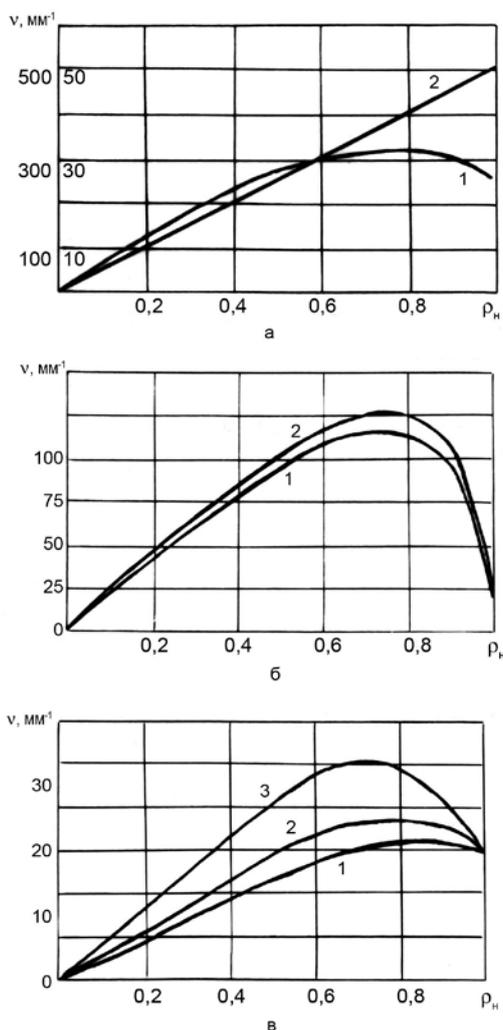


Рис. 2. Частотные характеристики голограммных оптических элементов, рассчитанные для различных диаметров световых полей (230 мм, 400 мм, 800 мм): а) для оптической системы рис. 1а,б (световой диаметр 230 мм, 1 – $0 \div 50 \text{ мм}^{-1}$, 2 – $0 \div 500 \text{ мм}^{-1}$); б) для оптической системы рис. 1в (1 – световой диаметр 230 мм (диаметр голограммы 140 мм); 2 – световой диаметр 400 мм (диаметр голограммы 220 мм)); в) для оптической системы рис. 1д (1,2,3 – световые диаметры 230, 400, 800 мм; v – пространственная частота; ρ_n – нормированный радиус голограмм)

Имеющееся технологическое оборудование обеспечивает изготовление рельефно-фазовых ГОЭ высокого оптического качества со световым диаметром до 230 мм и наибольшей 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 (уровни глубины травления материала, в котором «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 приемлемо использовать двухкомпонентные оптические системы, состоящие из линзового объектива и соответственно рассчитанного голограммного корректора. Пример такой оптической системы показан на рис. 3.

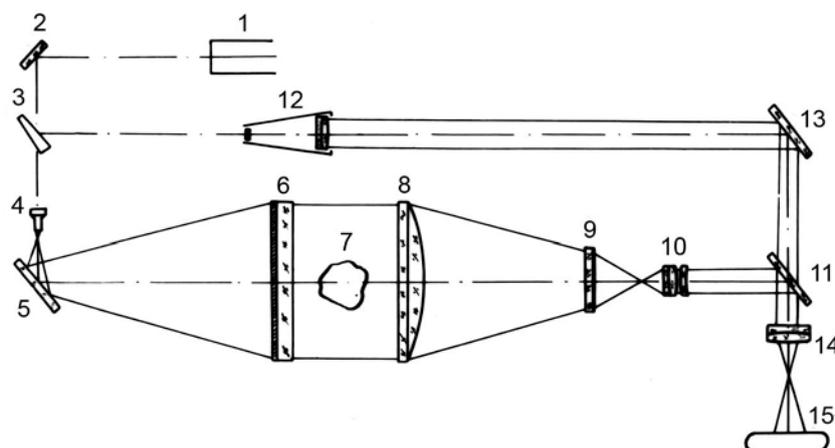


Рис. 3. Интерферометр на основе линзового объектива с голограммным корректором: 1 – лазер; 2,5,13 – плоские зеркала; 3,11 – светоделители; 4,10,14 – объективы; 6 – голограммный объектив; 7 – фазовый объект; 8 – плоско-выпуклая крупногабаритная линза; 9 – голограммный корректор; 12 – коллиматор; 15 – регистрирующая среда

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: оптических элементов и защитных стекол. При этом рельефно-фазовая структура ГОЭ может быть нанесена непосредственно на защитные стекла иллюминаторов газодинамических установок, что позволяет вдвое сократить количество используемых крупногабаритных оптических элементов.

Одним из способов создания крупногабаритных объективов систем ОФИ является использование принципа «обращения волнового фронта», основанного на использовании голограммного элемента с зарегистрированным волновым фронтом, характеризующим качество корригируемой оптической системы [7], и пропусканием восстановленной с голограммы световой волны через оптическую систему коллиматора в «обратном ходе» световых лучей: на выходе за счёт взаимной компенсации aberrаций реального прибора и восстановленной с голограммы волны достигаем получение «безабберационного» волнового поля.

На рис. 4 показана схема четырехзеркального (3, 4, 12, 14) интерферометра на основе двух встречно установленных основных объективов с узким эталонным пучком. Каждый объектив состоит из плоско-выпуклой линзы (световой диаметр 400 мм) и синтезированной голограммы – компенсатора (световой диаметр – 200 мм).

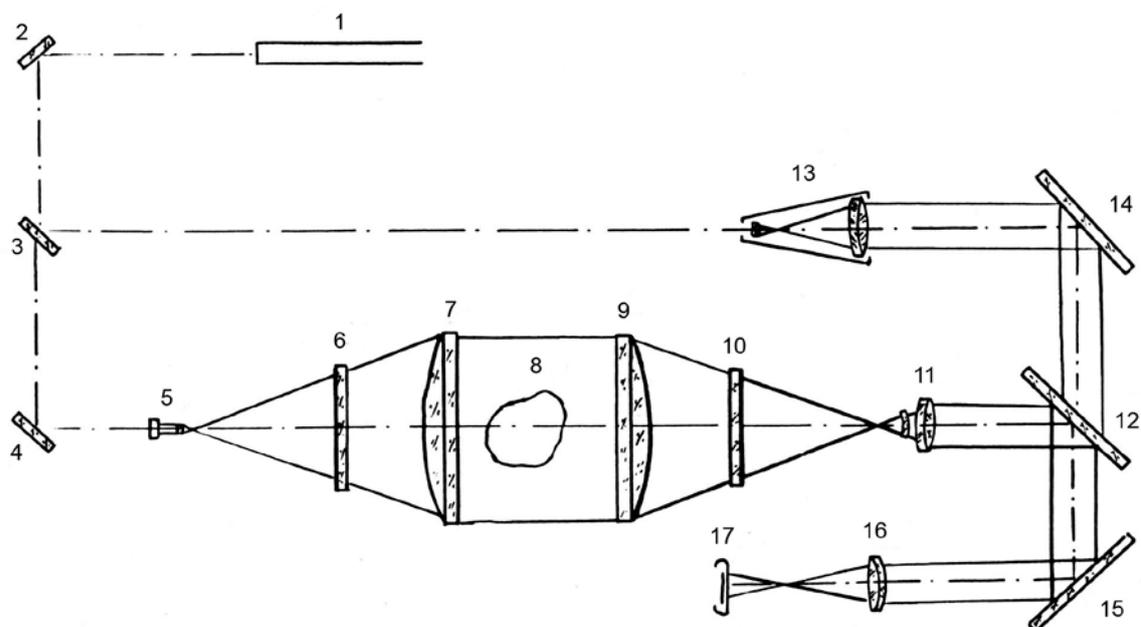


Рис. 4. Интерферометр по четырехзеркальной схеме на основе голограммно-линзовых объективов с полем визуализации диаметром 400 мм: 1 – лазер; 2-4,14,15 – зеркала; 5 – микрообъектив; 6,10 – голограммные компенсаторы; 7,9 – плоско-выпуклые линзы диаметром 400 мм; 8 – фазовый объект; 11,16 – объективы; 12 – светоделитель; 13 – телескопическая система; 17 – регистрирующая среда

На рис. 5, 6 показаны другие варианты этого голографического интерферометра с полем визуализации диаметром 400 мм. Функциональная схема интерферометра на основе 4-х осевых синтезированных голограммных линз показана на рис. 7, полученная с его помощью интерферограмма газового потока в сопле ударной трубы показана на рис. 8. Схема использована при создании интерференционно-теневого прибора ИАБ-462 с полем визуализации 230 мм. Остаточные aberrации оптической системы прибора не превышают 5λ , разрешающая способность оптической системы не менее 25 мм^{-1} по всему полю.

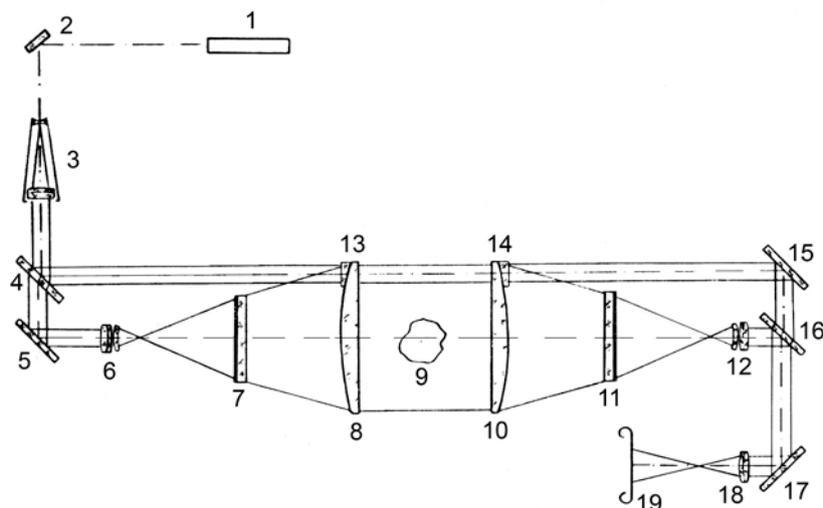


Рис. 5. Функциональная оптическая схема интерферометра на основе голограммно-линзовых объективов диаметром 400 мм: 1 – лазер; 2,5,15,17 – плоские зеркала; 3 – телескопическая система; 4,16 – светоделители; 6,12,18 – объективы; 7,11 – голограммные корректоры; 8,10 – плоско-выпуклые линзы диаметром 400 мм; 9 – фазовый объект; 13,14 – основные объективы с элементами (оптические клинья) для прохождения опорного пучка; 19 – регистрирующая среда

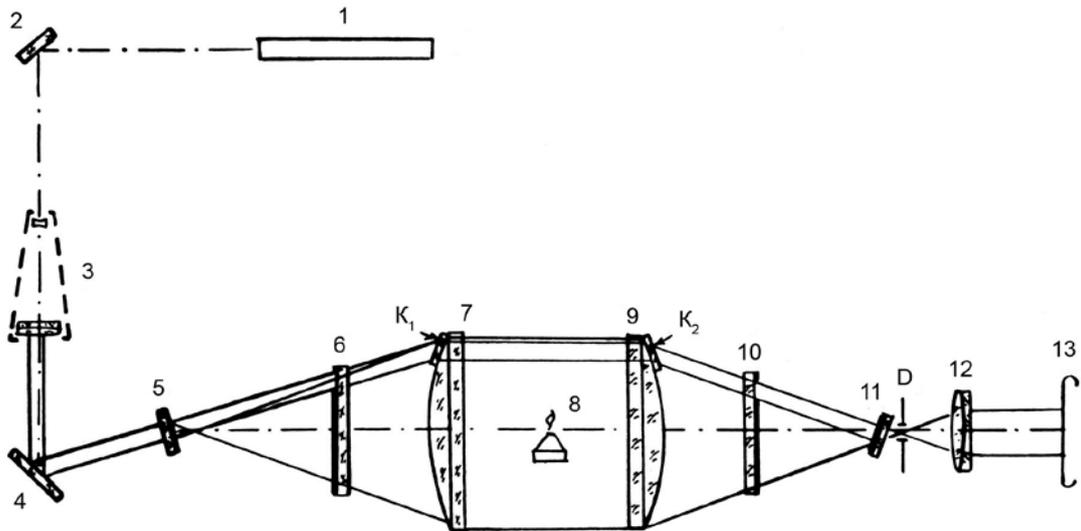


Рис. 6. Схема интерферометра с полем визуализации диаметром 400 мм с применением светоделительных СГОЭ: 1 – лазер; 2,4 – плоские зеркала; 3 – телескопическая система; 5,11 – светоделительные СГОЭ; 6,10 – голограммные компенсаторы; 7,9 – плоско-выпуклые линзы основных объективов; 8 – фазовый объект; 12 – линза; 13 – регистрирующая среда; Д – пространственный фильтр; K_1 и K_2 – оптические клинья

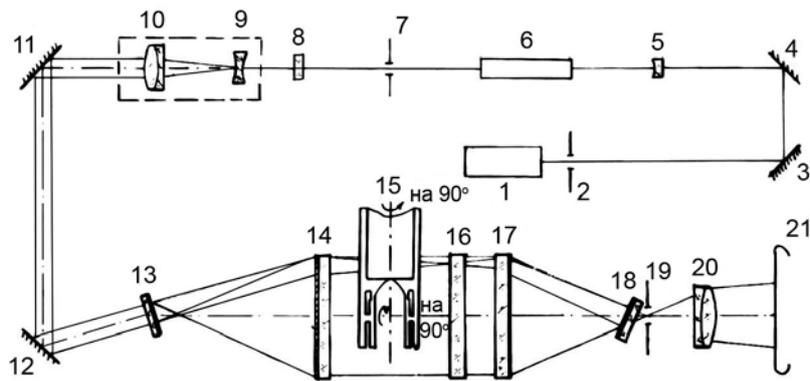


Рис. 7. Функциональная оптическая схема интерферометра на основе 4-х осевых синтезированных голограммных линз: 1 – лазер; 2,7,19 – диафрагмы; 3,4,11,12 – плоские зеркала; 5-8 – импульсный лазер; 9,10 – коллиматор; 13,18 – ГОЭ; 14,17 – ГОЭ-объективы; 15 – сопловой блок ударной аэродинамической трубы; 16 – защитное стекло; 20 – объектив; 21 – регистрирующая среда

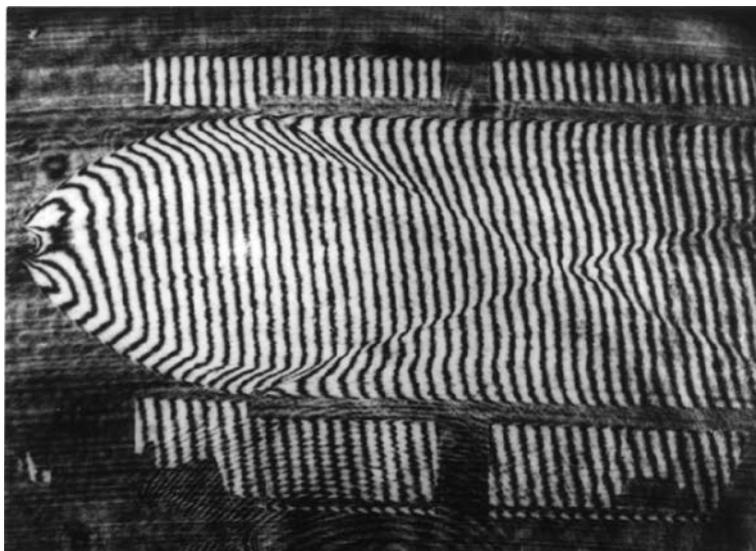


Рис. 8. Интерферограмма газового потока в сопле ударной трубы

Следует отметить, что образцы интерферометров для аэродинамических труб на основе применения голограммных объективов и голограммных корректоров с полем визуализации 400 мм были созданы впервые в мировой практике. На рис. 9 показан образец интерферометры по схеме Тваймана-Грина с голограммно-линзовым объективом с полем визуализации диаметром 800 мм, в объектной ветви – плоско-выпуклая линза 7 (световой диаметр 800 мм, $R = 1506,6$ мм) и голограммный компенсатор 6 (световой диаметр 200 мм).

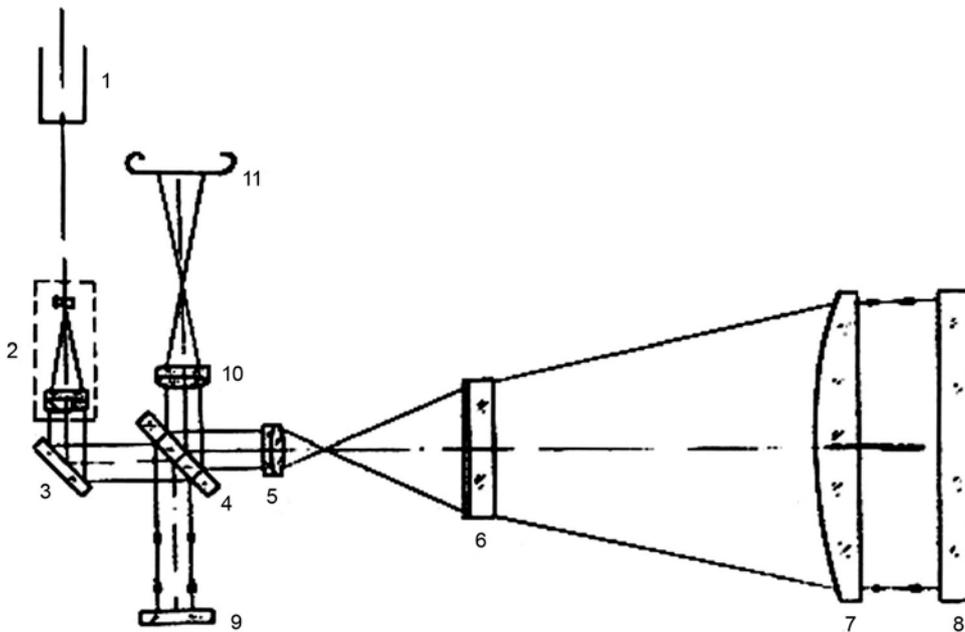


Рис. 9. Интерферометр Тваймана-Грина на основе голограммного компенсатора (диаметр поля визуализации – 800 мм): 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3,9 – зеркала; 4 – светоделитель; 5,10 – объективы; 6 – голограммный компенсатор; 7 – плоско-выпуклая линза; 8 – плоское зеркало; 11 – фотопленка

Качество оптической системы объектной ветви можно существенно скомпенсировать при голографической регистрации волновых фронтов (рис. 10): остаточная волновая aberrация составляет около $(1-2)\lambda$.

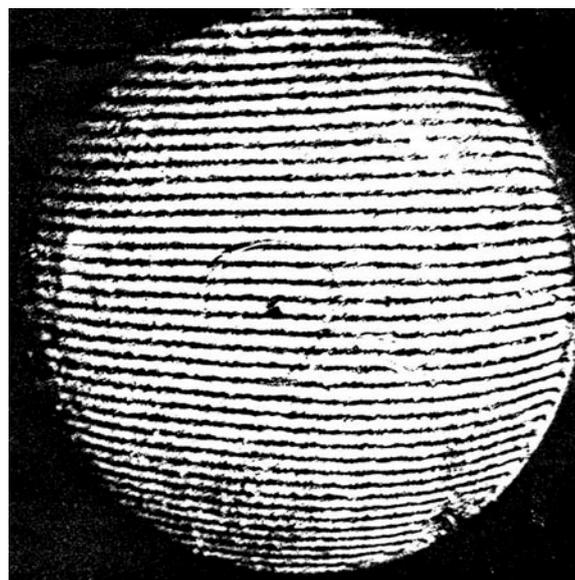


Рис. 10. Интерферограмма, характеризующая качество интерферометра с полем наблюдения диаметром 800 мм

Рассчитан, изготовлен и испытан зеркальный объектив с отражательной голограммой в качестве компенсатора (световой диаметр 250 мм, относительное отверстие 1:1,4). Последнее даёт реальную надежду создать компактный интерферометр с размером наблюдаемого поля 1000-1500 мм. Дальнейшее увеличение наблюдаемого поля систем ОФИ до 1500-2000 мм в диаметре, возможно на основе применения адаптивной оптики. В этом направлении проведены исследования, закончившиеся созданием макета теневого прибора с полем наблюдения диаметром 1500 мм (использовалось многокомпонентное плоское зеркало и зеркальный объектив по схеме Кассегрена, в качестве параболического – прожекторное зеркало). В результате работы показано, что тонкое (параболическое) зеркало должно быть изготовлено как можно точнее, а адаптивность должна заключаться не в существенном изменении формы поверхности, а лишь в некоторой коррекции её для компенсации влияния внешних воздействий.

Дифракционная эффективность голограмм, зарегистрированных во встречных пучках, теоретически может достигать 100 %. Известно [8], 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, имеет высокое качество.

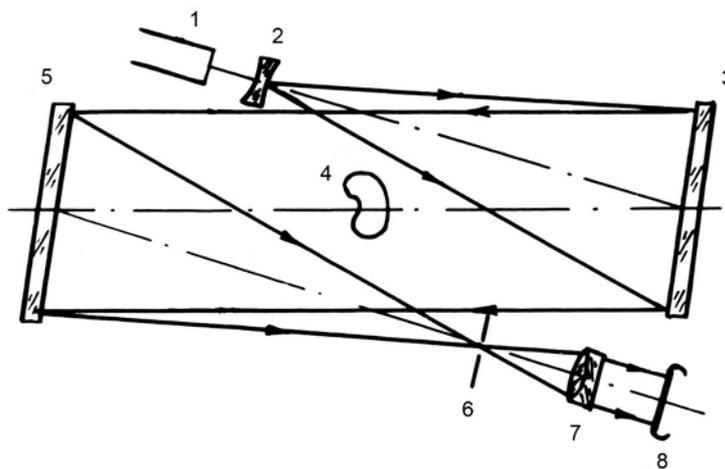


Рис. 11. Функциональная оптическая схема теневого прибора на базе голограммных зеркал: 1 – лазер; 2 – линзы; 3,5 – основные объективы – голограммные оптические элементы; 4 – фазовый объект; 6 – визуализирующая диафрагма; 7 – объектив; 8 – фоторегистрирующая среда

Для изучения трехмерных (пространственных) газовых потоков используют метод «острой фокусировки» [1]. Известно, что глубина резко изображаемого пространства уменьшается с увеличением апертуры пучка, просвечивающего пространственный фазовый объект. Поэтому в теневом методе «острой фокусировки» добиваются просвечивания фазового объекта набором элементарных пучков, образующих апертурный угол. Представляет практический интерес и получение интерференционных картин сечений пространственного газового потока. Обратимся к рис. 12. Когерентный пучок света W_1 освещает рассеиватель 1. Между ним и фотопластиной 4 вдоль оси Oy расположены фазовые объекты 2 и 3, расстояние между ними $-\Delta u$. При таком способе освещения через объекты 2 и 3 проходят световые пучки с апертурными углами θ_2 и θ_3 , соответственно. Часть лучей в пучке с апертурой θ_3 проходит через прозрачную неоднородность 2, а часть – только через 3. Голограмму получают по методу двух экспозиций.

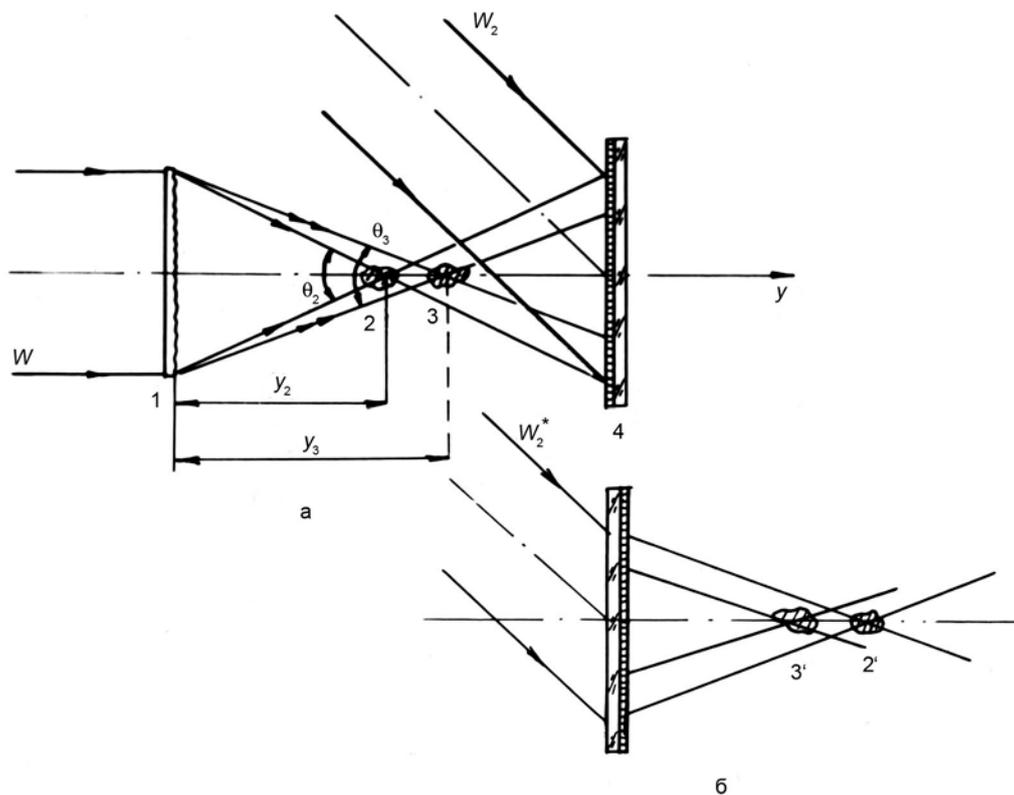


Рис. 12. К объяснению голографического метода "острой" фокусировки для получения интерференционных картин: схемы записи (а) и восстановления (б) голограммы при получении интерференционных картин сечений пространственной неоднородности

Технология метода «острой фокусировки» прошла экспериментальную проверку в газодинамическом эксперименте: в аэродинамической трубе ЭНИН им. Г.М. Кржижановского и в аэробаллистической трассе ФТИ им. А.Ф. Иоффе (рис. 13).

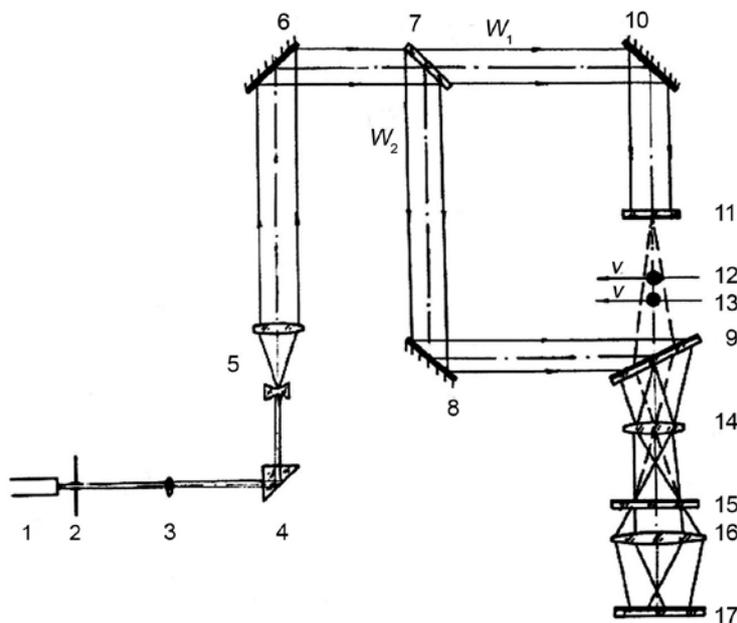


Рис. 13. Функциональная оптическая схема голографического устройства для аэробаллистической трассы: 1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – линза; 4 – призма; 5 – коллиматор; 6,8,10 – зеркала; 7 – светоделитель; 9 – голограмма; 11 – растр; 12,13 – модели; 14,16 – объективы; 15 – визуализирующая диафрагма; 17 – фотопленка

На рис. 14 а,б,в приведены фотографии теневых картин течения около летящих шаров, полученные с одной голограммы.

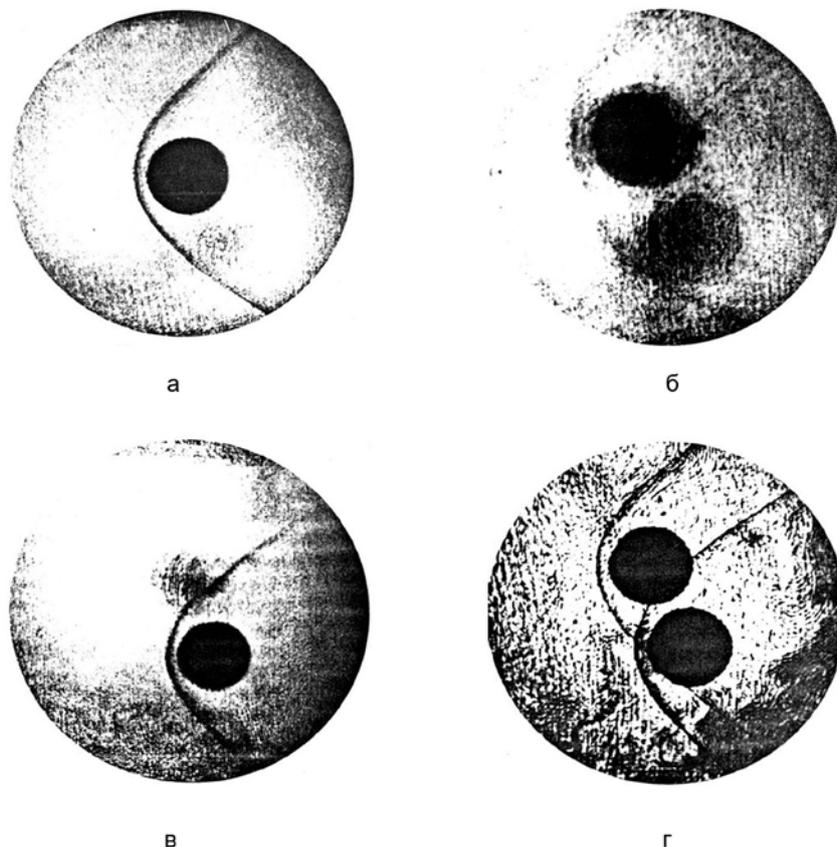


Рис. 14. а), б), в) Теневые картины течения около летящих моделей, соответствующие трем плоскостям фокусировки при восстановлении волновых полей с голограмм, полученных в оптической системе "острой" фокусировки: а) плоскость максимально удалена от голограммы; б) плоскость расположена между моделями; в) плоскость минимально удалена от голограммы; г) – теневая картина обтекания двух моделей, полученная с помощью обычного теневого метода

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы и прошли практическую экспериментальную проверку несколько типов не имеющих аналогов голографических интерферометров с размером рабочего поля от 230 до 1000 мм, с возможностью многократного увеличения информации, получаемой в одном газодинамическом эксперименте, повышения чувствительности измерений и исследования трехмерных газовых потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белозёров А.Ф.** Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань: Изд-во Казанского государственного университета, 2007. 747 с.
2. **Мустафин К.С.** Исследование отображающих свойств голограмм и возможностей их применения в оптическом приборостроении: Автореферат дисс... докт. техн. наук /ГОИ им. С.И. Вавилова, Л., 1975.
3. **Close D.H.** Holographic optical elements // *Optical Engineering*. 1975. Vol. 14. N 5. P. 408-419.
4. **Лукин А.В.** Синтезированные голограммы и их применение в оптическом приборостроении // *Оптическая запись и обработка информации* / Куйбышевский авиационный институт. Куйбышев, 1986. С. 5-16.
5. **Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Миронова Т.А., Нюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафиков Р.А.** Синтезированная голограммная оптика // *Оптический журнал*. 2002. № 12. С. 23-32.
6. **Мустафина Л.Т.** Исследования и разработка голографических методов и систем для изучения газовых потоков низкой плотности: Автореферат дисс... канд. техн. наук / Ленинградский государственный университет. Л., 1983.
7. **Белозёров А.Ф., Махмутов Э.Г., Спорник Н.М.** // *Проблемы голографии* / МИРЭА. М., 1973, вып. 3. С. 46-49.
8. **Кольер Р., Беркхардт К., Лин Л.** Оптическая голография. М.: Мир, 1973. с. 58-62.

A.F. Belozarov, A.V. Lukin

*Open Joint Stock Company "Scientific and Production Association
"State Institute of Applied Optics" (NPO GIPO), Russia,
420075, Kazan, N. Lipatova str., 2, E-mail: npogipo@tnpko.ru*

SYSTEMS TO VISUALIZE GAS DYNAMICS FIELDS OF DIMENSIONS OF UP TO 1000 MM USING HOLOGRAM OPTICAL ELEMENTS

ABSTRACT

This report presents some technical ways to solve the important problem of experimental gas dynamics – the development of a product range of systems designed to carry out optical and physical research: shade and interference devices intended to get gas flows visualized in the wind tunnels and ballistic paths within the operating field of dimensions of up to 1000 mm. In order to develop collimator objectives of 400-1000 mm in diameter and with the relative aperture of up to 1:2 for the optical and physical research systems, computer-generated hologram optical elements (CHOEs) of diffraction optics were used. Unique instruments have been developed and tested in the experiments.

INHOMOGENEITIES IN OPAQUE MEDIA, THREE-DIMENSIONAL GAS FLOW, VISUALIZATION, SHADE METHODS, METHODS OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY, HOLOGRAPHIC INTERFEROMETERS, COMPUTER-GENERATED HOLOGRAM OPTICAL ELEMENT, COLLIMATOR OBJECTIVE, "SHARP" FOCUSING