

УДК 535.42

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

А.Ф. БЕЛОЗЕРОВ, доктор техн. наук.

ФГУП «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань,

E-mail: nrogipo@tnpko.ru

Рассмотрены особенности и реальные возможности оптических методов апостериорного исследования волновых полей, деформированных при прохождении через фазовый объект (газовый поток) и восстановленных с однократно экспонированной голограммы, а также методов голографической интерферометрии. Показаны возможности апостериорного повышения чувствительности голографических интерференционных измерений на 1-2 порядка. Приведены схемы разработанных голографических установок для получения однократно экспонированных голограмм и изучения восстановленных с них волновых полей, голографических интерферометров и голографических анализаторов. Многие установки являются уникальными. Они имеют линейное поле до 800÷1000 мм и позволяют получить в одном эксперименте десятки оптических картин при различных углах наблюдения газового потока. Кроме того, за счет различной настройки интерференционной картины достигается многократное увеличение объема получаемой информации. Показаны интерферометры и теневые приборы, в которых в качестве основных объективов коллиматоров применены компьютерные (синтезированные) голограммные оптические элементы. Все типы разработанной аппаратуры апробированы в газодинамическом эксперименте.

Для визуализации картин обтекания моделей ЛА в аэродинамических трубах и аэробаллистических трассах широко применяются оптические методы, прежде всего теневые, интерференционные, светящейся точки [1]. Их важнейшими достоинствами являются высокая чувствительность, бесконтактность применения, отсутствие возмущения в изучаемом газовом течении, возможность проведения как качественных (форма и расположение скачков уплотнения, вихри, срывные течения, турбулентность, пограничный слой), так и количественных исследований (определения полей плотности, температур, давлений).

При интерференционных исследованиях газового потока изменение показателя преломления в какой-либо его части вызывает, в простейшем случае, смещение интерференционных полос в изучаемом поле относительно их положения в стандартном поле с известной плотностью. По найденным величинам смещений интерференционных полос определяют функцию $n(x, y, z)$ по соотношению:

$$N(x, y) = \frac{1}{\lambda} \cdot \int_{\xi_1}^{\xi_2} [n(x, y, z) - n_0] dz, \quad (1)$$

где N – величина смещения полос;

n_0 – показатель преломления стандартного поля;

n – показатель преломления исследуемого течения;

x, y, z – оси ординат;

ξ_1 и ξ_2 – пределы интегрирования.

Теневые картины используются для определения зависимости угла отклонения ε световых лучей газовым потоком от показателя преломления $n(x, y, z)$ по соотношению:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{f'}{a} \cdot \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{f'}{a} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{d \ln n(x, y, z)}{dy} dz, \quad (2)$$

где E – изменение освещенности в теневой картине, вызванное потоком;

f' – фокусное расстояние объектива теневого прибора;

a – ширина неперекрытого ножом Фуко участка изображения осветительной щели теневого прибора.

В одном эксперименте (при одной продувке в аэродинамической трубе) обычно удается получить ограниченную информацию об изучаемом течении: теневые или интерференционные картины или картины по методу светящейся точки. Эти картины получают к тому же при определенных параметрах используемой аппаратуры: форме визуализирующей диафрагмы, ширине и ориентации осветительной щели, величине перекрытия изображения щели визуализирующей диафрагмой – при теневых измерениях; ширине и ориентации интерференционных полос, длине волны используемого излучения при интерференционных измерениях. Таким образом, газодинамические исследования, особенно исследования пространственных течений, связаны с проведением большого количества экспериментов. В течение серии экспериментов должна быть обеспечена достаточная стабильность газового потока в аэродинамической установке, что само по себе является достаточно сложно осуществимым.

Современная газовая динамика выдвинула также ряд принципиально новых требований к измерительной аппаратуре. Одно из важнейших направлений исследований газовых потоков – изучение прозрачных неоднородностей, которые вызывают незначительную деформацию прошедшего через них волнового фронта, не превышающую $\lambda/10$. Такие объекты исследования принято называть «слабыми» неоднородностями. К ним относятся течения в аэродинамических трубах при низких давлениях, разреженные газовые потоки в ударных трубах, плазменные потоки, дальний след за моделью в баллистических установках, имеющие место при имитации обтекания летательных аппаратов на больших высотах. Изучение

таких явлений теньевыми методами, а также методами обычной двухлучевой интерферометрии становится невозможным из-за их недостаточной чувствительности при исследовании потоков со статическим давлением менее 1 мм ртутного столба.

Назовем еще несколько проблем, поставленных современной газовой динамикой перед исследователями. Сюда можно отнести необходимость исследования многофазных (чаще всего двухфазных – газ и твердые частицы) потоков при изучении процессов обтекания тел на гиперзвуковых скоростях потока, когда имеет место эрозия массы тела. Сложной задачей является изучение течения при ограничении подхода к нему через обычные защитные стекла (сильное свечение, сверхвысокие температуры). Поэтому возникает необходимость получения тневых или интерференционных картин при острой фокусировке на исследуемое течение или визуализации течения, находящегося за рассеивающей свет или фокусирующей прозрачной защитной стенкой. Эти проблемы возникают при изучении плазменных течений, при изучении процессов в резонаторах газодинамических лазеров и др.

Широкие возможности для изучения газодинамических течений, прежде всего для имитации условий полета 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. При исследованиях на аэробаллистической трассе более полно имитируются условия полета тел сложной формы на меньших высотах.

В баллистических установках все перечисленные выше новые проблемы газодинамического эксперимента – пространственные течения, разреженные потоки газа, двухфазные течения и др. – безусловно, также имеют место. Однако здесь наряду с картиной обтекания тела необходимо получать и другую информацию – координаты летящего тела в выбранном сечении трассы, величины скорости, ускорения. Это предъявляет ряд дополнительных специфических требований к измерительной аппаратуре, разрабатываемой для оснащения баллистических трасс. Созданные 20-30 лет назад интерференционно-тневые системы, апробированные на баллистических установках, удовлетворяют требованиям критерия стоимости, но размер поля наблюдения диаметром до 230 мм часто не удовлетворяет современным требованиям газодинамического эксперимента.

Учитывая большую длину баллистических трасс (десятки и сотни метров), необходимость исследования неоднородностей в прозрачных средах при больших размерах поля на-

блюдения (труба диаметром до 1500-3000 мм), большое количество контрольной оптической аппаратуры по длине волны (как правило, аппаратура устанавливается в нескольких десятках сечений по направлению полета тела), возможность значительного (многие десятки см) изменения траектории модели во время полета по трассе, высокую начальную скорость полета (до десяти и более км/с), 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), баллистический эксперимент вбирает в себя квинтэссенцию всего ранее достигнутого в экспериментальной газовой динамике. Здесь становятся жизненно необходимыми требования увеличения информации, получаемой в одном эксперименте, унификации используемой аппаратуры, экономические требования (приемлемая стоимость аппаратуры). Задачи еще более усложняются при моделировании в полете процессов «встречи» и взаимодействия летящего тела с преградой.

Применение голографии и методов голографической интерферометрии позволило кардинально решить ряд проблем и новых задач при визуализации изучения газовых потоков в аэродинамическом и баллистическом экспериментах. Голограмма позволяет «заморозить» во времени волновое поле после прохождения через изучаемую прозрачную неоднородную среду. Восстановленное волновое поле может апостериорно изучаться оптическими методами. Это свойство голограммы дает возможность получить в одном эксперименте информацию о прозрачной неоднородности, намного превышающую данные, получаемые обычным образом.

Е. Лейт и Ю. Упатниекс [2] предложили получать голограмму с внеосевым опорным пучком, что позволило пространственно разделить восстановленные волны. Ю.Н. Денисюк впервые предложил получать голограммы во встречных пучках [3]. В этом случае опорная волна падает на регистрирующую среду с одной стороны, а объектная – с другой. Обе технологии реализованы в конструкциях голографической аппаратуры, в методах и методиках изучения фазовых объектов (газовый поток – типичный пример фазового объекта) при восстановлении волновых полей с голограммы.

Особенность фазового объекта состоит в том, что он не изменяет амплитуду прошедшей световой волны, но отклоняет световые лучи от первоначального направления. Фазовые объекты, как правило, характеризуются сравнительно небольшим диапазоном пространственных частот. Углы отклонения ε_0 световых лучей в прозрачных неоднородностях ограничиваются

обычно величиной $\varepsilon_0 \leq 5 \cdot 10^{-2}$ радиан. Если объектная волна получает некоторую рефракцию на исследуемом объекте, то отклоненные и прямопрошедшие лучи объектного пучка взаимодействуют и образуют интерференционные полосы. Если при получении голограммы вводится внеосевой пучок, то результирующая голограмма фиксирует картину взаимодействия по крайней мере трех волн: опорной, прямопрошедшей и отклоненной объектом. Рассмотрим особенности восстановления волнового фронта с такой голограммы. Принимаем, что объектная и опорная волны плоские, при получении голограммы используется внеосевой опорный пучок, а плоскость установки голограммы находится на некотором расстоянии от объекта.

На рис. 1 приведена принципиальная схема получения голограммы фазового объекта, отклоняющего световые лучи под углом $\Delta\beta$ относительно нормали к плоскости голограммы. Для простоты рассмотрим одномерный случай. В плоскости голограммы взаимодействуют три волны: прошедшая мимо объекта с амплитудой a_0 ; отклоненная объектом $a_0 \exp(ik\Delta\beta \cdot x)$; опорная внеосевая $a_1 \exp(ik\Delta\theta \cdot x)$, θ – угол между нормалью к голограмме и направлением опорного пучка (для небольших углов $\sin \theta \approx \theta$).

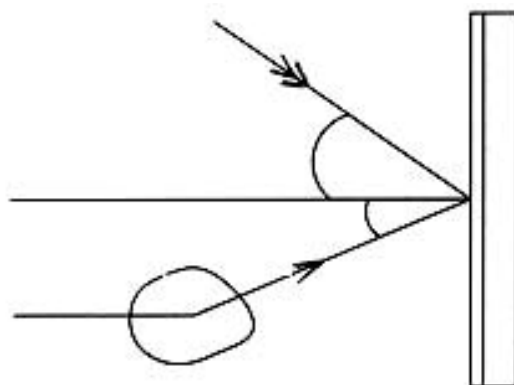


Рис. 1. Схема регистрации голограмм фазового объекта
1 – прозрачная неоднородность; 2 – голограмма.

После обработки регистрирующей среды амплитудное пропускание голограммы определяется выражением:

$$\begin{aligned} \tau_a = & \left(a_1^2 + 2a_0^2 \right)^{-\gamma/2} \left\{ 1 - \frac{a_0 a_1 \gamma}{a_1^2 + 2a_0^2} \left[\cos k\theta x + \cos k(\theta - \Delta\beta)x + \frac{a_0}{a_1} \cos k\Delta\beta \cdot x \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\gamma(\gamma + 2)}{2} \left(\frac{a_0 a_1}{a_1^2 + 2a_0^2} \right)^2 \left[\cos k\theta x + \cos k(\theta - \Delta\beta)x + \frac{a_0}{a_1} \cos k\Delta\beta x \right]^2 + \dots \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

На стадии восстановления полученная голограмма освещается исходной опорной волной $a_1 \exp(ik\Delta\theta \cdot x)$. Как видно из выражения (3), в первом порядке дифракции, кроме объектных волн a_0 и $a_0 \exp(ik\Delta\beta \cdot x)$ появятся побочные волны $a_0 \exp(-ik\Delta\beta \cdot x)$, $a_0 \exp(2ik\Delta\beta \cdot x)$ и т.д., которые описываются членами разложения (3) более высокой степени, чем первая. Побочные волны можно рассматривать как результат дифракции волн из второго, третьего и т.д. порядков в первый. Интерферируя друг с другом, они образуют многолучевую шумовую интерференционную картину, которая ухудшает качество восстановленного изображения.

Из выражения (3) следует, что при выполнении условия $(a_0 a_1 / a_1^2 + 2a_0^2 \leq 1)$ третьим и последующими членами разложения можно пренебречь. Условие выполняется, если $a_0 \gg a_1$ или $a_0 \ll a_1$. При этом (3) примет вид:

$$\tau_a = \left(a_1 + 2a_0^2\right)^{-\gamma/2} \left\{ 1 - \frac{a_0 \cdot a_1 \cdot \gamma}{a_1^2 + 2a_0^2} \left[\cos k\theta x + \cos k(\theta - \Delta\beta)x + \frac{a_0}{a_1} \cos k\Delta\beta x \right] \right\} \quad (4)$$

Таким образом, шум в восстановленной картине может быть устранен, если объектный и опорный пучки существенно различной интенсивности, т.е. голограмма получена при линейных условиях. Однако, линейная регистрация голограмм фазового объекта в некоторых случаях нежелательна, так как волны высших порядков дифракции, восстановленные с голограммы при нелинейной записи голографического поля, могут использоваться для увеличения чувствительности измерений в голографической интерферометрии. Кроме того, получение голограмм при линейной записи голографического поля приводит к ухудшению видности голографических полос, что создает трудности при изучении восстановленной волны различными оптическими методами.

В случае оптического сопряжения объекта с плоскостью голограммы получаем голограмму сфокусированного изображения [4]. При этом ее амплитудное пропускание зависит от распределения интенсивности, определяемого взаимодействием только двух волн – опорной $a_1 \exp(ik\Delta\theta \cdot x)$ и объектной $a_0 \exp(ik\Delta\beta \cdot x)$. Полагая $a_0 = a_1$, запишем амплитудное пропускание голограммы сфокусированного изображения для случая нелинейной записи в виде:

$$\tau_a = \left(2a_0^2\right)^{-\gamma/2} \left[1 - \frac{\gamma}{2} \cos k(\theta - \Delta\beta)x + \frac{\gamma(\gamma + 2)}{8} \cos^2 k(\theta - \Delta\beta)x + \dots \right], \quad (5)$$

где γ – коэффициент контрастности фоторегистрирующей среды.

Отсюда следует, что восстановленные побочные волны имеют такую же фазу, как и объектная волна, и, следовательно, не вносят помех. Таким образом, с голограммы сфокусирован-

ного изображения, полученной как при линейных, так и нелинейных условиях записи поля, восстанавливается объектная волна без каких-либо искажений. Она может быть исследована известными оптическими методами: светящейся точки, теневыми и интерференционными [1]. Однако, реализация этих методов при изучении восстановленного с голограммы волнового фронта имеет некоторые особенности. Вследствие двухступенчатого характера и других особенностей голографического процесса качество получаемых оптических картин зависит от качества голограммы и способа восстановления волнового фронта. Для обеспечения достаточной точности измерений по этим картинам необходимо выполнение специальных требований к когерентности источника света при получении голограммы и восстановлении с нее световых волн, к фоточувствительным регистрирующим средам, используемым при получении голограммы, к оптической системе аппаратуры.

Замечательные особенности голографической интерферометрии – существенное уменьшение требований к качеству оптических элементов оптических систем интерферометров и качеству самих оптических систем, возможность интерференции волн, существующих в различных временных интервалах, апостериорность изучения восстановленных с голограмм волновых фронтов – позволили создать новый класс приборов – голографические интерферометры с большими размерами поля наблюдения (до 400, 800, 1000 мм и более). Достижения в голографической интерферометрии кардинально повысили эффективность газодинамического эксперимента и вывели это направление приборостроения на новый технический уровень.

В таблице 1 (в матричном виде) представлены две неразрывно связанные между собой части газодинамического эксперимента: с одной стороны – проблемы, с другой стороны – созданные методы и аппаратура для решения этих проблем. Такое представление позволяет комплексно подойти к решению современных проблем изучения газовых течений.

В таблице показана основная проблематика современного газодинамического эксперимента (строки 1-19). Знаком «•» отмечена возможность их реализации теневыми и интерференционными приборами первого поколения (показано в графах А, Б, В, Г). Проблемы, решаемые с помощью новой техники, прежде всего голографической, отмечены знаком «+». Задачи, такие как баллистические исследования (строки 7-10), изучение трехмерных течений (строка 12), изучение потоков низкой плотности (строка 11), решались ранее только в единичных экспериментах, на макетах аппаратуры, отдельными исследователями. Новая техника позволяет поставить проведение этих сложнейших работ в нормальное «техническое русло». Среди задач, отмеченных знаком «+», некоторые являются принципиально новыми для газодинамического эксперимента: изучение газовых потоков при поле наблюдения размером более

400 мм (строка 13), апостериорность исследований (строка 18), количественные исследования трехмерных течений при многократном увеличении объема информации в одном эксперименте (строка 12). Приведем примеры практического применения голографии в газодинамическом эксперименте.

А. Голографические установки на основе теневого прибора ИАБ-451

Голографическая установка с обычным расположением коллиматоров теневого прибора, с сохранением Z-образного расположения основных объективов, создана при использовании схемы на рис. 2. Это осуществляется с помощью голографической приставки к теневому прибору, обеспечивающей разделение пучка лазера на объектный и опорный, формирование их и сведение в плоскости голограммы, восстановление волнового фронта с голограммы и направление его в объектив приемной части теневого прибора. Приставка состоит из двух основных частей: осветительной и регистрирующей. Осветительная часть устанавливается на каретке зеркально-менискового объектива приемной части; приемная (регистрирующая) – на каретке коллиматора теневого прибора ИАБ-451 [5].

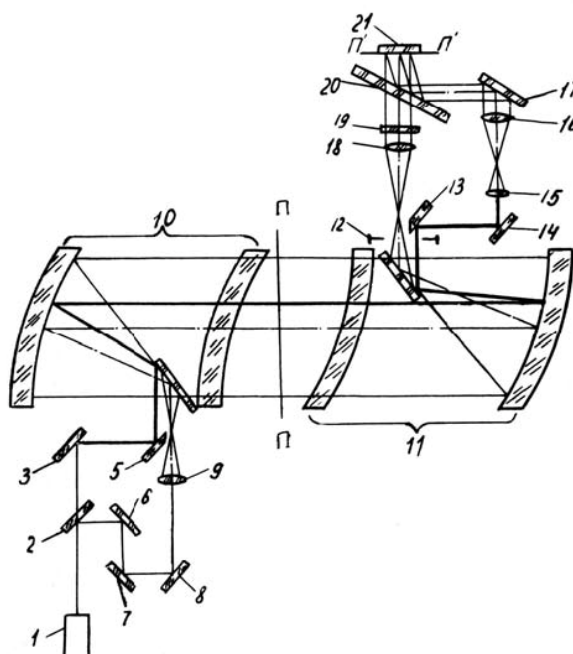


Рис. 2. Схема получения голограммы на теновом приборе ИАБ-451 с голографической приставкой
 1 – лазер; 2 – светоделитель; 3,5-8,13,14,17 – плоские зеркала; 9,15 – линзы; 10 – приемный объектив и
 11 – коллиматор теневого прибора ИАБ-451; 16,18 – объективы; 19 – интерференционный фильтр; 20 –
 полупрозрачная пластина; 21 – голограмма.

Таблица 1

Приборы и системы ОФИ для контроля неоднородностей в прозрачных средах	Теневые, интерфер. приборы				Многофункциональные интерф.-теневые системы ОФИ							Многофункц. коорд.-теневые системы ОФИ				Многофункциональные голографические системы ОФИ											
	П	Е	Р	Е	Ч	Е	Н	Ь	Р	А	З	Р	А	Б	О	Т	О	К	С	И	С	Т	Е	М	О	Ф	И
	Обозначения	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	
	1		•		•	+		+			+	+			+		+	+	+	+		+			+	+	
	2			•				+		+	+		+													+	+
	3					+	+	+			+	+														+	+
НАИМЕНОВАНИЕ	4	•		•							+	+	+	+												+	+
	5			•							+	+		+												+	+
	6											+		+													
	7			•		+		+			+		+	+		+									+		
ПРОБЛЕМ	8					+		+																+			
	9																							+			
	10														+												
	11						+		+		+	+									+		+				+
	12														+										+		
	13										+	+				+		+	+	+		+					+
	14										+															+	+
	15																						+	+	+		
	16										+															+	+
	17				•	+	+	+		+	+	+				+					+	+	+	+	+	+	+
	18															+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	19					◇		◇		◇	◇	◇			◇	◇	◇	◇	◇	◇		◇			◇	◇	◇

- 1 Измерение и контроль $n(x, y)$ в поле до \varnothing 230 мм.
 - 2 Измерение и контроль $\varepsilon(x, y)$ в поле до \varnothing 230 мм.
 - 3 Одновременное измерение и контроль $n(x, y)$ и $\varepsilon(x, y)$ в поле до \varnothing 230 мм.
Изучение структуры потоков:
 - 4 Контроль формы и расположения скачков плотности.
 - 5 Турбулентность, пограничные слои.
 - 6 Определение координат скачков плотности.
Баллистические исследования:
 - 7 Структура течений.
 - 8 Измерение и контроль $\rho(x, y)$.
 - 9 Измерение и контроль плотности $\rho(x, y, z)$.
 - 10 Координатные измерения.
 - 11 Контроль газовых и плазменных потоков низкой плотности.
 - 12 Измерение и контроль $n(x, y, z)$ в одном эксперименте.
 - 13 Контроль потоков газа с поперечным сечением 400, 600, 800, 1000 мм
 - 14 Контроль многофазных течений.
 - 15 Контроль плазменных потоков между защитными стеклами, не имеющими оптического качества. Самосвечение.
 - 16 Контроль потоков в резонаторах лазеров.
 - 17 Расширение областей применения.
 - 18 Апостериорность контроля.
 - 19 Оптимизация требования к аппаратуре. Перспективность.
- А Прямо-теневые приборы.
 - Б Интерферометры ИЗК-453, ИЗК-454.
 - В Теневые приборы ТЕ-19, ТЕ-20, ИАБ-451.
 - Г Лазерные интерферометры.
 - Д Интерференционно-теневой прибор ИАБ-458.
 - Е Трехлучевой ДИ.
 - Ж Зеркальный РП-460.
 - З Реализация метода «добавок».
 - И Интерференционно-теневой прибор ИАБ-455.
 - К Унифицированные модули.
 - Л Уменьшение внешних воздействий.
 - М Стереоскопический прибор по методу светящейся точки.
 - Н Стереоскопические теневые приборы.
 - О Интерферометр с двумя направлениями просвечивания.
 - П Баллистические стенды.
 - Р Диаметр до 230 мм. ВЭ-667.
 - С Диаметр 400-460 мм. ИЗК-462.
 - Т Диаметр 800 мм. ИЗК-463.
 - У Диаметр 1000-1500 мм.
 - Ф Трехлучевой.
 - Х На основе СГОЭ.
 - Ц Многоходовые.
 - Ч Многокурсовые.
 - Ш Универсальные голографические установки.
 - Щ Анализаторы волновых фронтов.

При восстановлении волнового поля (рис. 3) осветительная часть приставки снимается с каретки приемного объектива 10, на ее место устанавливаются визуализирующие диафрагмы или интерференционные устройства для реализации, соответственно, теневых или интерференционных методов исследования. Регистрирующая часть используется для освещения голограммы. Восстановленный волновой фронт объективом 18 направляется в теневого прибор. Для фоторегистрации и наблюдения получаемых интерференционных и теневых картин используется приемная часть теневого прибора в обычном варианте.

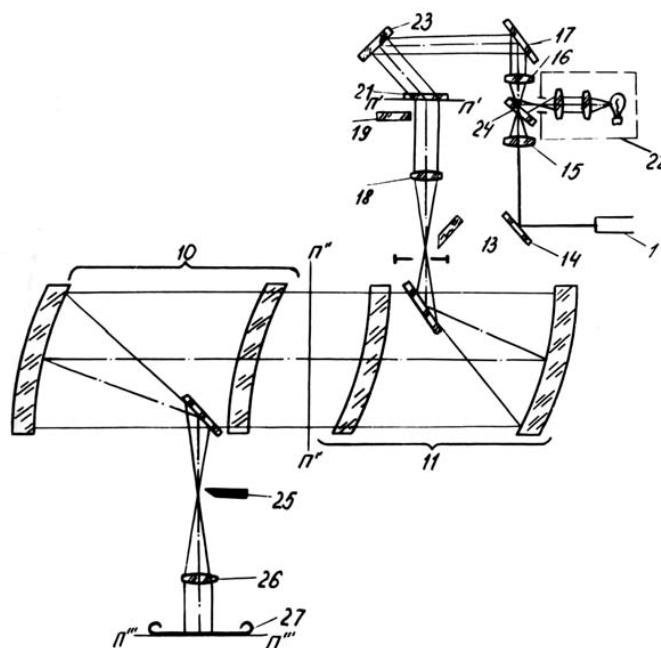


Рис. 3. Схема восстановления волновых полей с голограммы на теновом приборе ИАБ-451 с голографической приставкой
22 – осветитель (лампа накаливания, конденсор, щель), 23, 24 – плоские зеркала, 25 – нож Фуко, 26 – линза, 27 – фоторегистратор.

С помощью голографической приставки РП-460 исследовалось обтекание стального шара диаметром 21 мм в свободном полете ($M_\infty = 1,8$) на баллистической трассе ФТИ им. А.Ф. Иоффе при нормальном атмосферном давлении.

Все интерференционные и теневые картины, рассматриваемые ниже, получены апостериорно при восстановлении волнового фронта с одной объектной голограммы, т.е. характеризуют обтекание модели потоком воздуха за время одного и того же выстрела в аэробаллистической трассе [6].

На рис. 4а,б,в приведены теневые картины, полученные по методу ножа и щели; шири-

на осветительной щели составляла 0,08 мм; величина перекрытия изображения щели ножом изменялась. Картины а,б получены при использовании белого света. Осветительная щель и нож Фуко ориентированы перпендикулярно вектору скорости набегающего потока. Теневая картина (в) получена при восстановлении волнового поля в монохроматическом свете, щель и кромка ножа параллельны вектору скорости набегающего потока.

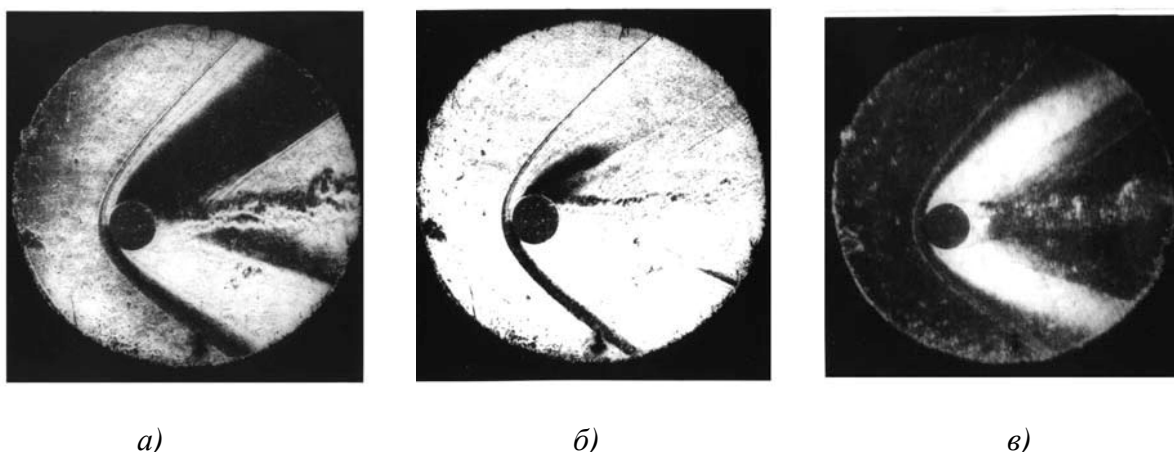


Рис. 4. Теневые картины, полученные с голограммы методом ножа и щели при различных величинах перекрытия изображения щели ножом

а) нож и щели ориентированы перпендикулярно вектору скорости набегающего потока; источник света – лампа накаливания;

б) нож и щель ориентированы параллельно вектору скорости набегающего потока; источник света – ртутная лампа ДРЦ-250 с интерференционным фильтром ($\Delta\lambda = 20$ нм), ширина щели 0,08 мм.

На рис. 5 приведена цветная теневая картина, получена при восстановлении волнового фронта в белом свете. Осветительная и визуализирующая щели ориентированы параллельно полосам голографической решетки.

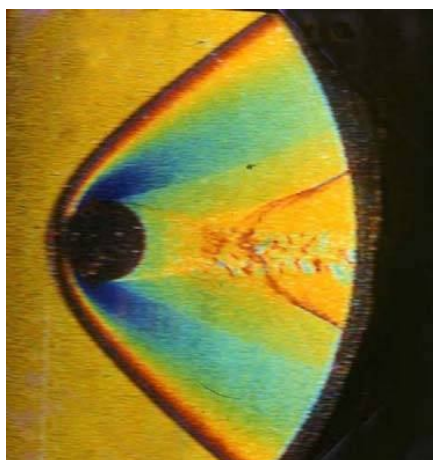


Рис. 5. Цветной теневой снимок

На рис. 6а,б,в приведены теньевые картины, полученные методом расфокусированной нити при различной величине расфокусировки нити и ее ориентации. Восстановление волн с голограммы при этом осуществлялось в монохроматическом свете. Ширина осветительной щели – 0,1 мм; толщина нити – 0,08 мм. Теньевые картины имеют достаточное качество и пригодны для расшифровки.

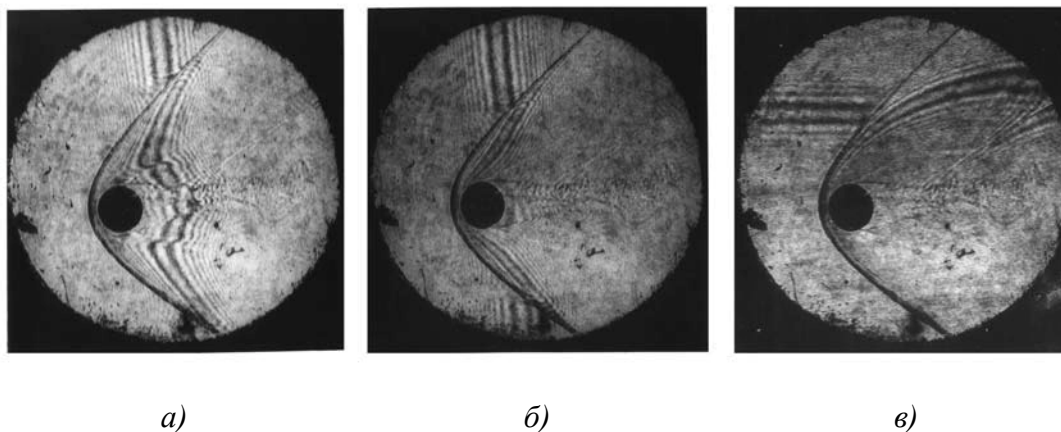


Рис. 6. Теньевые картины, полученные с голограммы методом расфокусировки нити с различной ее ориентацией и величиной расфокусировки

а) нить параллельна ($\Delta > 0$); б) нить параллельна ($\Delta < 0$); в) нить перпендикулярна вектору скорости набегающего потока, ширина осветительной щели – 0,1 мм, толщина нити – 0,08 мм

Интерференграммы сдвига, приведенные на рис. 7а,б,в,г, получены с помощью интерференционной приставки РП-452 к теньевому прибору ИАБ-451. Интерференграммы а,б получены при использовании монохроматического источника света; в,г – с лазером. Качество интерференграмм «в» и «г» ниже, чем интерференграмм «а,б». Это обусловлено влиянием дифракционных помех.

На рис. 8а,б приведены интерференграммы, полученные с использованием схем дифракционного (а) и поляризационного (б) интерферометров сдвига при восстановлении волнового фронта в монохроматическом свете. В качестве интерференционных устройств использовались дифракционная решетка ($d = 0,02$ мм) и призмы Волластона. Решетка и призма устанавливались вблизи фокальной плоскости объектива 10 (рис. 3) вместо визуализирующей диафрагмы 25. В осветительной части призма устанавливалась в осветителе 22 вместо щели.

Двухлучевые интерференграммы, приведенные на рис. 9а,б, получены при восстановлении волновых фронтов с двух отдельных голограмм (голограмма с объектом и голограмма без объекта в объектном пучке) при различной настройке интерференционной картины: а) настройка на полосы конечной ширины; б) настройка на полосу бесконечной ширины.

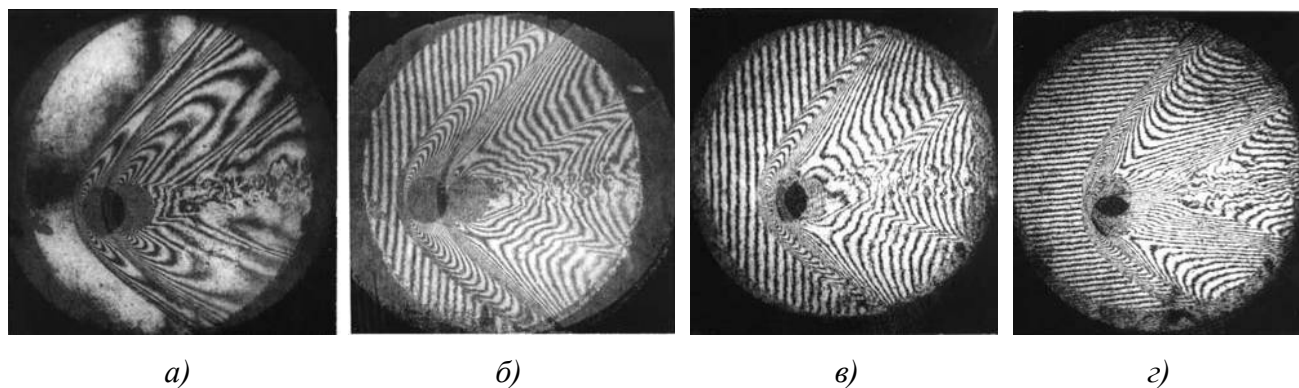


Рис. 7. Интерферограммы сдвига, полученные с голограммы с помощью интерференционной приставки РП-452 к теневому прибору
a, б) источник монохроматического света (ртутная лампа ДРШ-250 с интерференционным фильтром $\Delta\lambda = 20$ нм); *в, г*) источник света лазер ЛГ-36

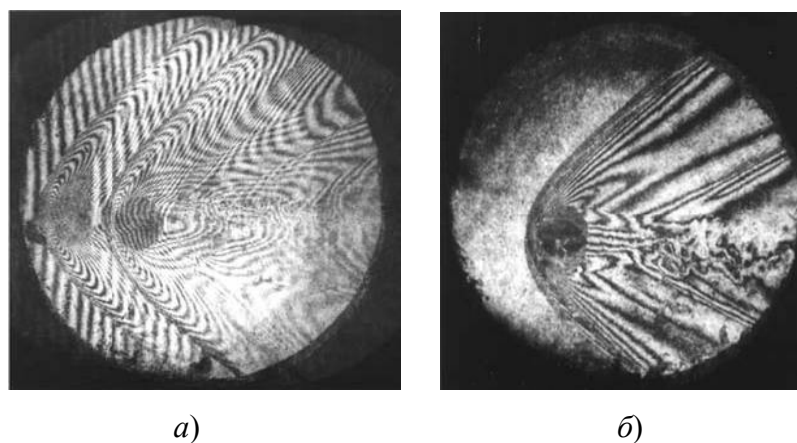


Рис. 8. Интерферограммы сдвига, полученные с голограммы с использованием схем дифракционного (а) и поляризационного (б) интерферометров

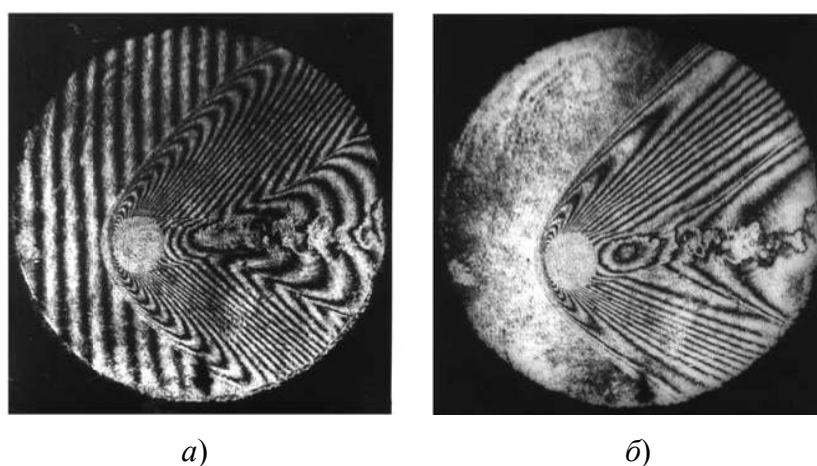


Рис 9. Интерферограммы, полученные при восстановлении волновых фронтов с двух отдельных голограмм
a) настройка на полосы конечной ширины;
б) настройка на полосу бесконечной ширины

Б. Голографический интерферометр с опорной волной, сформированной из объектной

На рис. 10 дана схема компактного голографического интерферометра, в котором опорный пучок формируется из объектной после его прохождения через исследуемую неоднородность [7]. Для получения интерференционной картины при восстановлении волнового поля необходимо, чтобы в опорном пучке, формируемом с помощью рассеивателя, отсутствовала прямопрошедшая составляющая при получении голограмм.

Созданная голографическая приставка (индекс БЗС-1) к теневому прибору используется в баллистическом эксперименте в НИИ ПММ при Томском Государственном университете и ФТИ им. И.Ф. Иоффе [7].

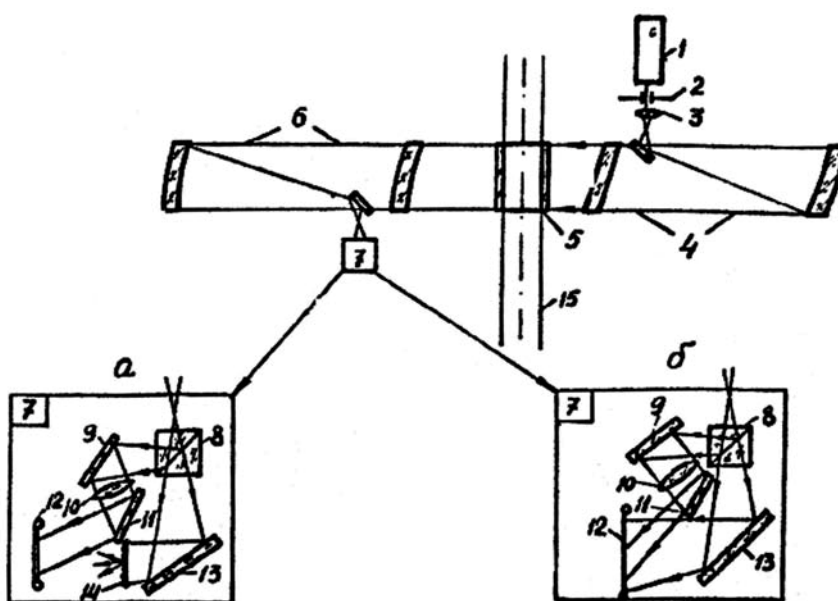


Рис. 10. Оптическая схема голографического интерферометра БЗС-1 с опорной волной, сформированной из объектной.

1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – линза; 4, 6 – зеркально-менисковые объективы; 5 – зона объекта; 8 – светоделительный кубик; 9, 11, 13 – зеркала; 10 – объектив; 12 – голограмма; 14 – рассеиватель; 15 – аэродинамическая труба

В. Голографический интерферометр на основе сферических зеркал

Принципиальная оптическая схема голографического интерферометра ВЭ-667 приведена на рис. 11. Фазовый объект просвечивается параллельным пучком лучей. Узкий опорный пучок, использующий основные элементы объектного пучка, проходит через рабочую зону, с помощью поворотных зеркал 6 и 11 он может перемещаться в пределах рабочего светового поля [8].

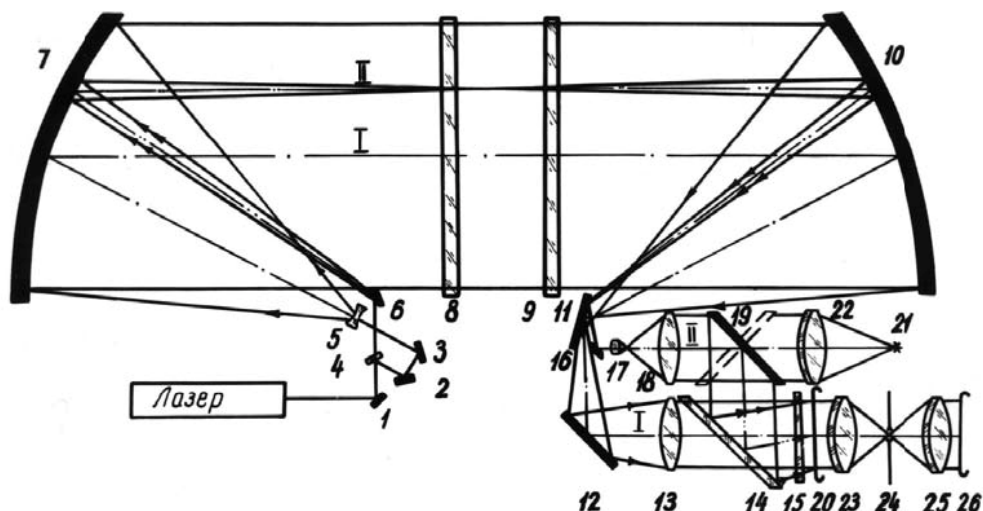


Рис. 11. Принципиальная схема голографического интерферометра на основе сферических зеркал ВЭ-667

1-3,6,11,12,19 – плоские зеркала; 4,14 – полупрозрачные пластины; 7,10 – сферические зеркала; 8,9 – защитные стекла; 5,17,18 – линзы; 22,23,25,13 – объективы; 15 – светофильтр; 20 – голограмма; 21 – лампа накаливания; 24 – диафрагма; 26 – фотокамера; I-I – объектный пучок; II-II – опорный пучок.

Схема прибора ВЭ-667 стала базовой для разработки нескольких типов голографических интерферометров различного назначения. Схема наглядно показывает «необычные» возможности голографической интерферометрии – уменьшение требований к качеству оптической системы интерферометра: до изобретения голографии классическая оптика не допускала и мысли о применении в схеме интерферометра сферических зеркал без компенсационных оптических элементов, да еще и без соблюдения принципа Z-образного размещения зеркал.

Г. Голографическая установка ГУ-1 с просвечиванием газового потока расходящимся пучком лучей (коинцидентная система)

Оптическая система установки ГУ-1 (рис. 12) включает ветви для формирования объектного и опорного волновых полей. Она позволяет зафиксировать на голограмме наблюдаемый процесс, а затем апостериорно изучать его оптическими методами. Объектная ветвь – коинцидентная, практически, безаберрационная система. Она может работать и как самостоятельный теневой прибор или сдвиговый интерферометр. Опорная ветвь использует плоское зеркало 13, жестко связанное со сферическим 8, для формирования узкого опорного пучка; в этом случае максимально использованы оптические элементы объектной ветви. Поэтому установка ГУ-1 называется универсальной и предназначена для оснащения аэродинамических труб и исследо-

вания потоков оптическими теньевыми, интерференционными и голографическими методами. Радиус кривизны сферического зеркала для аэродинамических труб – до 4,0-10,0 метров.

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. Это условие в сочетании с одинаковым увеличением в обеих ветвях (равенство диаметров световых пучков при отсутствии виньетирования) предполагает полное совпадение структуры интерферирующих волновых фронтов, что является одной из основных предпосылок хорошего контраста интерференционных полос записываемой голографической решетки.

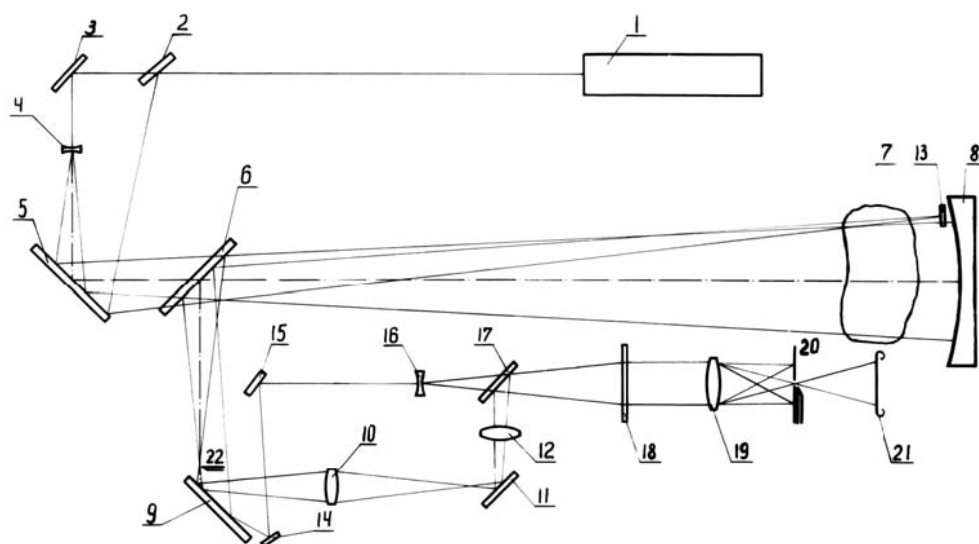


Рис. 12. Оптическая схема голографической установки ГУ-1

1 – источник света (лазер ЛГ-38); 2,6,17 – полупрозрачные пластинки; 3,5,9,11,13-15 – плоские зеркала; 4 – отрицательная линза; 7 – исследуемое пространство; 8 – сферическое зеркало; 10,12 – приемная система; 16 – отрицательная линза; 18 – голограмма; 19 – объектив; 20,22 – нож Фуко; 21 – плоскость фотопленки

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 частота полос на голограмме составляет $m = 100 \text{ мм}^{-1}$ (ширина полосы $e = 0,01 \text{ мм}$). Допустимое смещение одного из пучков в этом слу-

чае $1/4e = 0,0025$ мм. Соответственно, допустимый разворот сферического зеркала $\alpha = \frac{1/4e}{2R}$, что в нашем случае ($R = 3873$ мм) составит около одной угловой секунды.

Учитывая, что при увеличении размеров рабочего поля нельзя полностью пренебречь влиянием aberrаций оптической системы голографического интерферометра и качества входящих в него оптических элементов на качество интерференционной картины, разработаны два типа новых установок с диаметром наблюдаемого поля 400-800 мм [9].

Д. Нецентрированная оптическая система с голографической коррекцией aberrаций

При изучении восстановленного волнового фронта оптическими методами была осуществлена коррекция aberrаций оптической схемы записи голограммы. Восстановление волнового фронта проводится в направлении, противоположном ходу лучей при записи голограммы, т.е. используется принцип обращенного хода лучей через оптическую схему [10].

Для пояснения обратимся к схеме записи и восстановления волнового поля на рис. 13.

Волна, поступившая в оптическую систему:

$$A = a(x, y)e^{ikz}; \quad (6)$$

где $a(x, y)$ – распределение амплитуд в плоскости xoy .

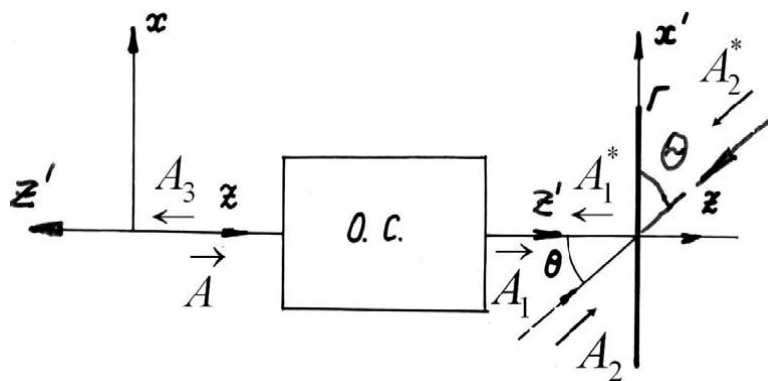


Рис. 13. Схема, поясняющая голографический принцип коррекции aberrаций оптической системы (O.C.)

ZZ' – оптическая ось; θ – угол голографирования

Волна, прошедшая ОС и упавшая на голограмму Г, установленную в плоскости изобра-

жения, имеет вид:

$$A_1 = a(x, y) \exp^{ik[\Delta z(x', y')]} , \quad (7)$$

где $\exp^{ik\Delta z(x', y')} = t(x, y)$ – комплексный коэффициент пропускания оптической системы;
 $z(x', y')$ – величина, характеризующая искажение (деформацию) волны, вызванное аберрациями системы, дефектами оптических элементов, неточностью юстировки и т.п.

Запись голограммы осуществляется по двухлучевой схеме с опорной волной:

$$A_2 = a_2(x', y') e^{-ik\theta x} , \quad (8)$$

где θ – угол голографирования.

Полученная таким образом голограмма устанавливается на прежнее место и просвечивается волной

$$A_2^* = a_2^*(x', y') e^{-ik\theta x} , \quad (9)$$

комплексно сопряженной с опорной (8). Через оптическую систему в обратном направлении распространяется восстановленная волна, комплексно сопряженная с сигнальной (7)

$$A_1^* = a_1^*(x', y') e^{-ik[z + \Delta z(x, y)]} . \quad (10)$$

В этом случае распределение амплитуды в предметной плоскости будет:

$$A_3 = A_1^* \cdot t(x, y) = a_3'(x, y) e^{-ikz} , \quad (11)$$

т.е. аберрации оптической системы компенсируются. В оптическую систему (ОС) направляется плоская волна.

Корректирующая голограмма использована в приборе, созданном на основе сферических зеркал диаметром 400 мм при Z-образном их расположении в оптической схеме. Относительное отверстие зеркального объектива – 1:3. Качество достигнутой коррекции видно из рис. 14.

Е. В установках второго типа применена децентрированная оптическая система на основе сферических зеркал с использованием афокальных компенсаторов для коррекции аберраций оптической системы. Разработаны оптические системы таких установок с относительным отверстием до 1:4÷1:3,5.

Афокальные компенсаторы в системах с относительным отверстием до 1:3,5 рассматриваются как средство частичного уменьшения аберраций системы. Их применение целесообразно в сочетании с голографическими методами коррекции (например, метод переноса ин-

формации с объектного пучка на опорный, применение корректирующей голограммы и т. д.).

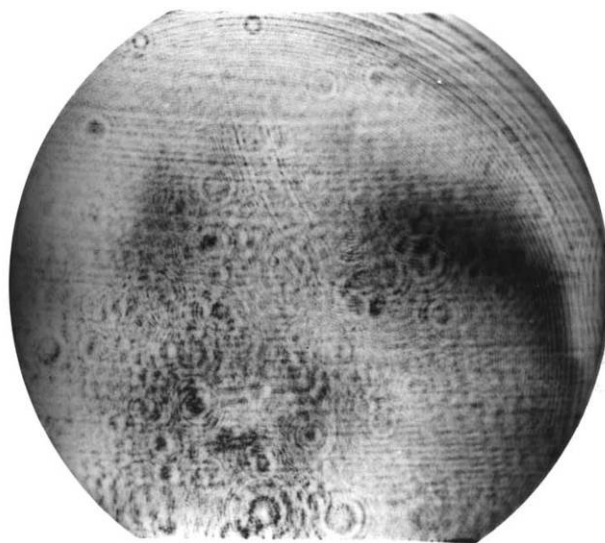


Рис. 14. Качество оптической системы с использованием сферических зеркал диаметром 400 мм. Настройка на полосу бесконечной ширины

Принципиальная схема установки второго типа реализована в серийном отечественном голографическом интерферометре, индекс ИЗК-462, с диаметром наблюдаемого поля 400 мм [9]. Оптическая схема прибора приведена на рис. 15. Интерферометр включает в свой состав и голографический анализатор волновых полей, восстанавливаемых с голограммы. Прибор апробирован на ударной трубе диаметром 350 мм в ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. Были реализованы голографические интерференционные методы двух экспозиций, реального времени, двух отдельных голограмм. На рис. 16 приведена серия интерферограмм газового потока за сопловой решеткой. Качество картин свидетельствует о работоспособности интерферометра. По этой же схеме создан интерференционно-теневого прибор ИАБ-461 (рабочее поле диаметром 400 мм, относительное отверстие объектива 1:4,3), предназначенный для работы теневыми методами, методами сдвиговой и голографической интерферометрии. Прибор испытан в режиме дифракционного интерферометра с рабочим полем 200 мм на баллистической трассе ФТИ им. А.Ф. Иоффе (рис. 17).

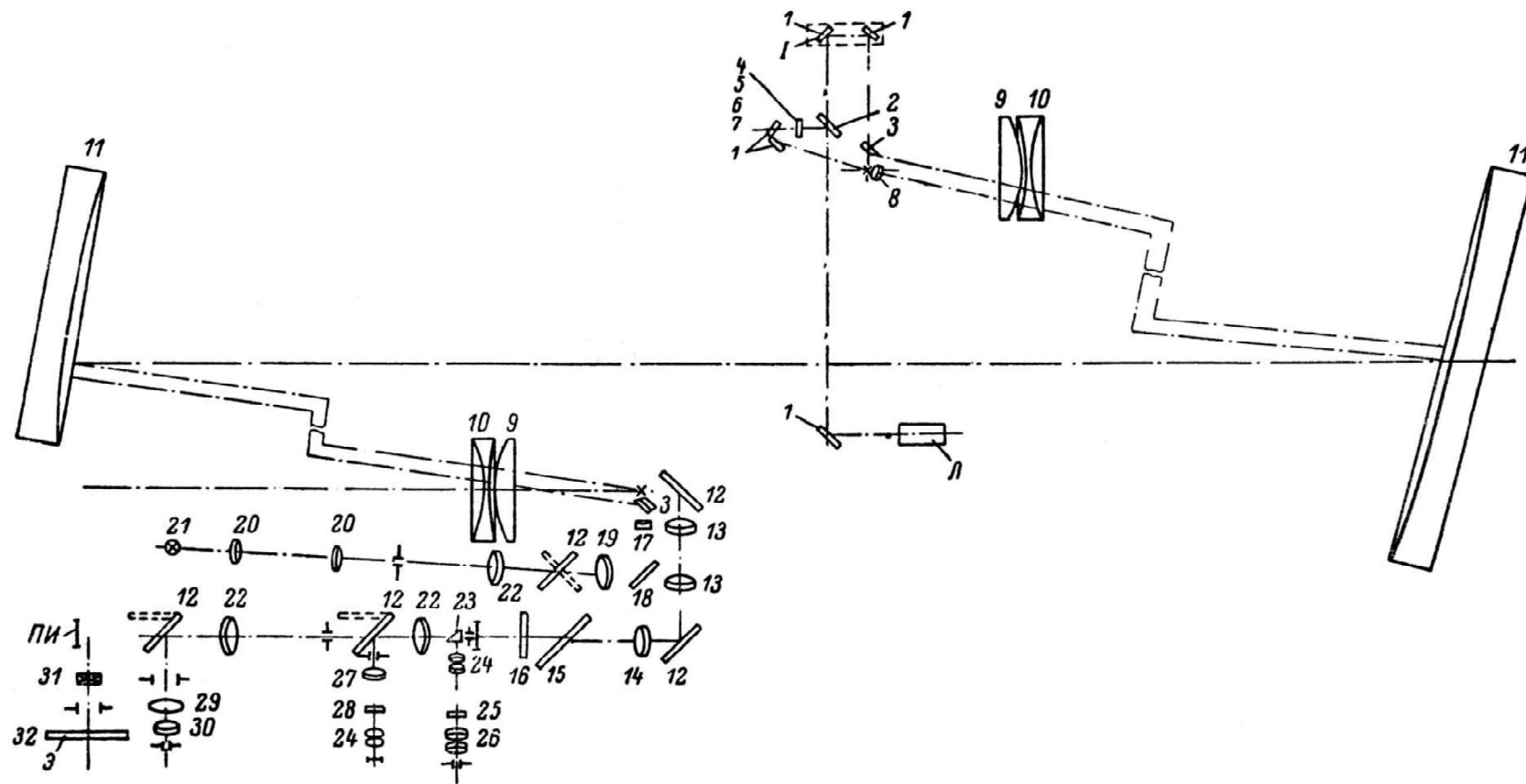


Рис. 15. Оптическая схема голографического интерферометра ИЗК-462

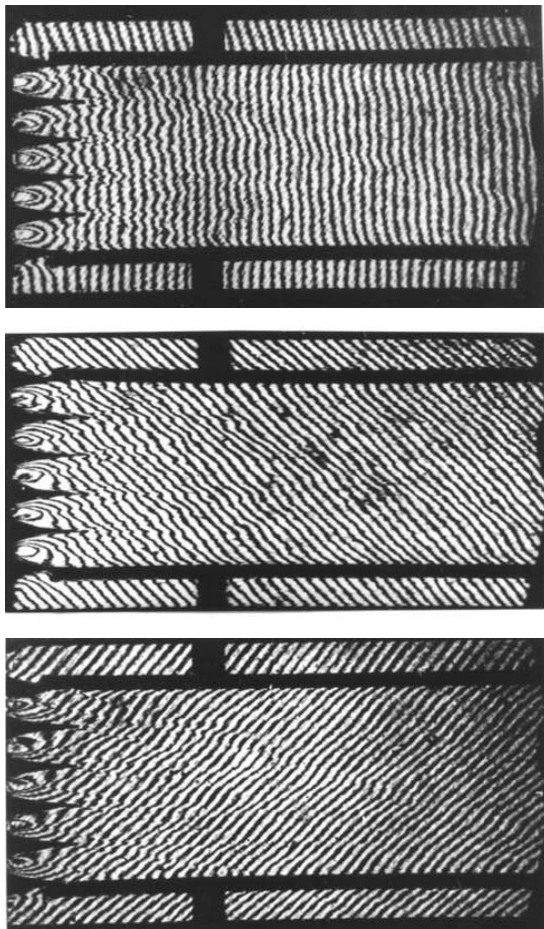


Рис. 16. Голографические интерферограммы течений газа в сопловой решетке, присоединенной к торцу ударной трубы



Рис. 17. Интерферограмма обтекания шара в сверхзвуковом полете, полученная на дифракционном интерферометре с увеличенным размером рабочего поля (200 мм). Получена В.А. Комиссаруком и Н.П. Менде*).

Ж. Голографические интерферометры с центральным экранированием объектного пучка

Использование в голографическом интерферометре оптической системы пониженного качества ($50\lambda \div 70\lambda$) вынуждает выполнять тщательную разработку механизмов совмещения голограмм (или пучков) как в самом интерферометре, так и в анализаторе волновых фронтов. В том случае, когда не предъявляются жесткие требования к установке прибора на объекте, целесообразно использовать системы улучшенного качества с исправлением aberrаций до $5\lambda \div 10\lambda$. Такая система может использоваться и для получения теневых картин.

*) Автор доклада приносит свои извинения В.А. Комиссаруку и Н.П. Менде за недостаточно корректное размещение на сайте интерференционных картин на рис. 11,17,22, не имеющих отношения к теме доклада.

Аберрации центрированных зеркальных систем с экранированием светового пучка, в основном, определяются сферическими зеркалами. Для предварительной оценки качества системы можно воспользоваться формулой расчета волновой аберрации вогнутого сферического зеркала [11]:

$$h_y = \frac{y^4}{32f_0^3}, \quad (12)$$

где y – высота луча над оптической осью;

f_0 – фокусное расстояние сферического зеркала.

В нашем случае при $y = 230$ мм, $f_0 = 1496$ мм, $h_y = 26 \cdot 10^{-3}$ мм или $h_y = 41\lambda$ ($\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-3}$ мм). При расчете центрированной системы из двух идентичных встречных зеркал получаем $h_y = 78\lambda$. Именно с такими характеристиками система была взята за основу при построении голографического интерферометра.

На основании проведенных предварительных расчетов зеркальных систем с компенсаторами можно сделать вывод:

- введение компенсаторов позволит существенно уменьшить аберрации (до $15 \div 20\lambda$);
- введение компенсаторов приведет к некоторому увеличению зоны экранирования (~ 20 мм по диаметру) и усложнению конструкции (центрировка компенсатора относительно зеркала). Принципиальная оптическая схема интерферометра ИГЦ-460 с размером наблюдаемого поля 460 мм приведена на рис. 18.

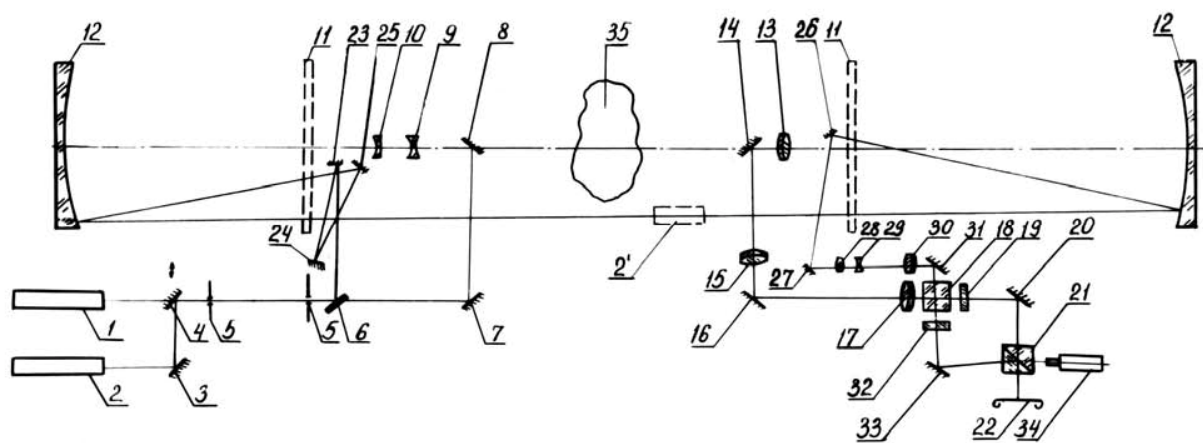


Рис.18. Принципиальная оптическая схема голографического интерферометра ИГЦ-470 с центральным экранированием пучка

1,2,2' – лазеры; 3,4 – зеркала; 5 – диафрагмы; 6 – полупрозрачная пластина; 7,8,14,16,20,23-27,31,33 – плоские зеркала; 9,10,28,29 – конденсорные устройства; 11 – защитные стекла; 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 фотопленки; 34 – микроскоп; 35 – неоднородность.

При определении конструктивных параметров прибора необходимо оптимизировать размер зоны центрального экранирования, размер и положение экранирующего кронштейна, прохождение узкого опорного пучка, обеспечить настройку на полосы заданного направления с одновременной компенсацией смещений пучка.

Интерферометр ИГЦ-460 испытан в аэродинамической трубе Т-107 ЦАГИ (труба постоянного действия, замкнутого типа, с закрытой рабочей частью, со скоростью потока воздуха $M_\infty = 0,08$). Рабочая часть трубы круглого сечения диаметром 2,7 метра и длиной 3,5 метра с глухими стенками. Для выравнивания поля скорости сверху и снизу установлены накладки переменного сечения. Исследуемая модель в рабочей части подвешивается на профилированных лентах шириной 30 мм, в месте соединения лент в центре поля зрения интерферометра подвеска модели образует экранирующую область $\approx 35 \times 100$ мм.

На рис. 19а,б,в,г представлены интерферограммы обтекания профиля крыла при $M_\infty = 0,2$ и углах атаки $\alpha = 0, 2, 4, 8$ градусов, соответственно. Для данного изоэнтропического течения интерференционные полосы представляют линии равных давлений. Необходимо отметить, что при $M = 0,2$ в аэродинамических трубах с малой рабочей частью при геометрическом ходе лучей в изучаемой прозрачной неоднородности ~ 10 см теневые и интерференционные приборы течение или совсем не визуализируют, или визуализируют очень слабо из-за малой сжимаемости газового потока и недостаточной чувствительности оптических приборов. В нашем случае газовый поток около профиля с помощью изогнутых интерференционных полос визуализирован хорошо. Увеличение чувствительности произошло из-за большой геометрической длины хода лучей в исследуемой неоднородности ($L = 1500$ мм).

3. Голографический интерференционно-теневой прибор с полем визуализации диаметром 800 мм

Прибор ИЗК-463 с полем визуализации диаметром 800 мм [9] представляет собой комбинированный интерференционно-теневой прибор, в котором интерферограммы получаются голографическим методом, а теневые картины – классическим. Такое сочетание достигается при использовании оптической системы сравнительно высокого качества (расчетная величина волновых aberrаций не превышает 5λ). Оптическая схема этого уникального прибора аналогична приведенной на рис. 19. Объектная ветвь образована двумя встречными зеркально-линзовыми коллиматорами ($f' = 3200$ мм, относительное отверстие 1:4). Узкий опорный пучок

проходит через те же зеркально-линзовые коллиматоры по верхнему (или нижнему) краю рабочей зоны.

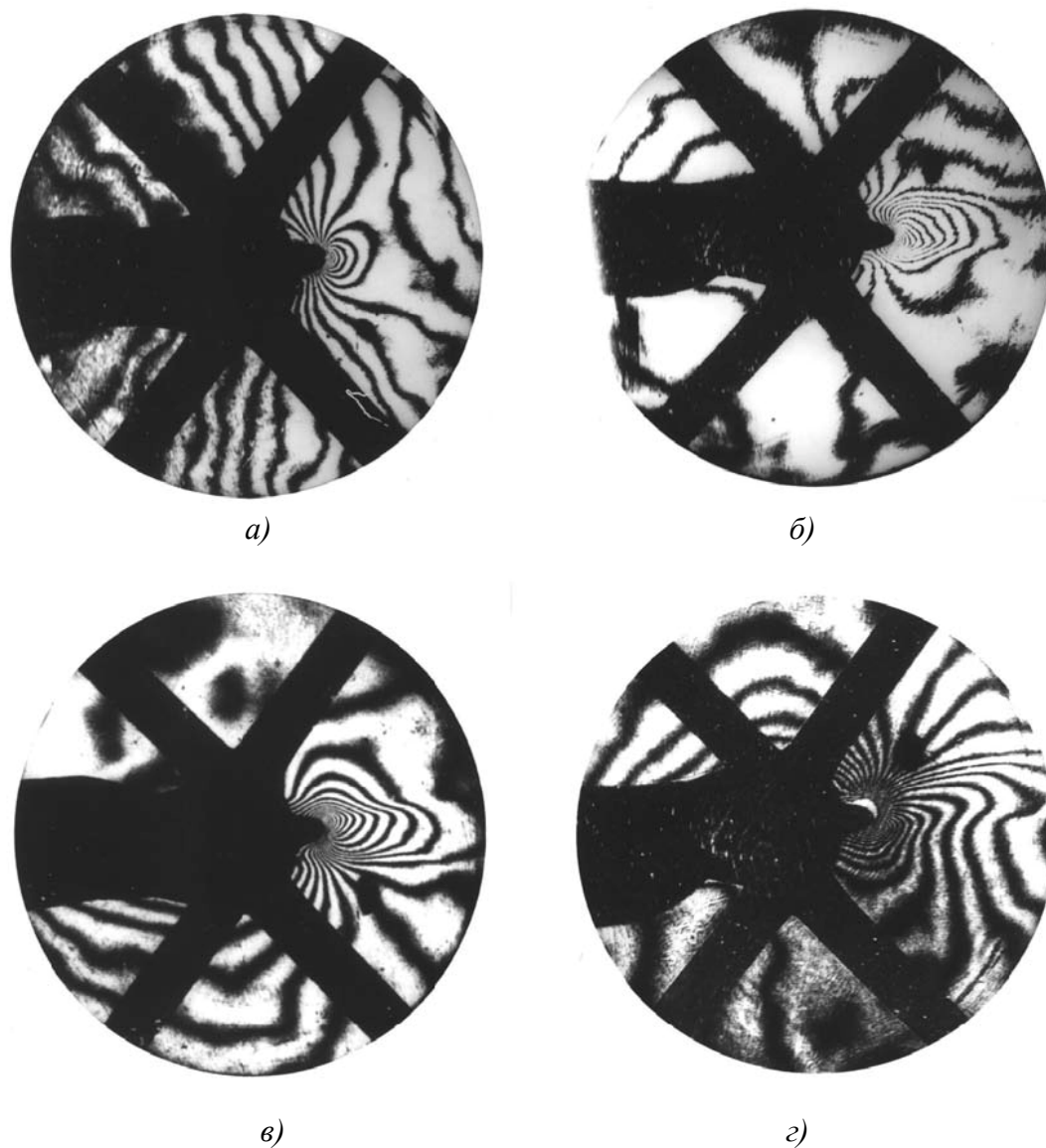


Рис. 19. Интерферограммы обтекания профиля крыла при $M_\infty = 0,2$ и углах атаки а) $\alpha = 0^\circ$; б) $\alpha = 2^\circ$; в) $\alpha = 4^\circ$; г) $\alpha = 8^\circ$

II. Многокурсный голографический интерферометр

Голографическая интерферометрия с рассеянным объектным пучком применяется для количественного исследования пространственных потоков. За время одного эксперимента необходимо получить набор интерференционных картин в диапазоне углов наблюдения от 0 до 90° , а если пространственный объект имеет сложную форму, то от 0 до 180° [12]. Угол наблю-

дения меняется в этом диапазоне непрерывно. Многоракурсные интерферометры позволяют получить набор картин при ракурсах наблюдения, строго определенных конструкцией прибора.

Пятиракурсный голографический интерферометр (рис. 20) применен на аэробаллистической трассе. Изучалось обтекание летящей пули (цилиндрическая модель с конической головной частью). Носик модели имел сферическую форму. Диаметр цилиндрической части – 8 мм. Скорость полета: $M_\infty = 2,6$. Угол атаки – до 45° . На рис. 21а приведены интерферограммы пространственного течения, соответствующие настройке на бесконечно широкую полосу. На рис. 21б показаны интерферограммы, полученные при настройке интерферометра на полосы конечной ширины.

При рассмотрении методов голографической интерферометрии с повышенной чувствительностью измерений также сохраняется возможность использования оптики пониженного качества. Определены практические направления работ по повышению чувствительности голографических интерференционных измерений:

- а) для повышения чувствительности измерений \sim на 1 порядок целесообразно использовать способ нелинейной записи голограмм при многократном просвечивании потока газа;
- б) для повышения чувствительности измерений на 2 порядка целесообразно использование методов трех- и многолучевой интерферометрии.

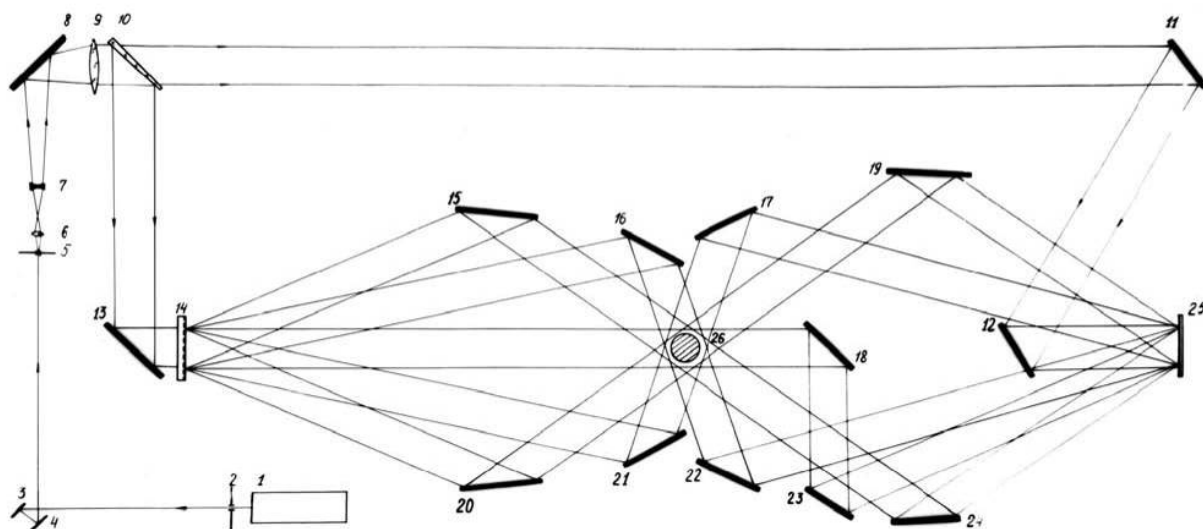


Рис. 20. Оптическая схема пятиракурсного голографического интерферометра на основе дифракционной решетки. Размер рабочего поля 100 мм
1 – лазер; 2,5 – диафрагмы; 3,4,8,11-13,15-24 – зеркала; 6-9 – коллиматор; 10 – светоделитель; 14 – дифракционная решетка; 25 – регистрирующая среда; 26 – объект

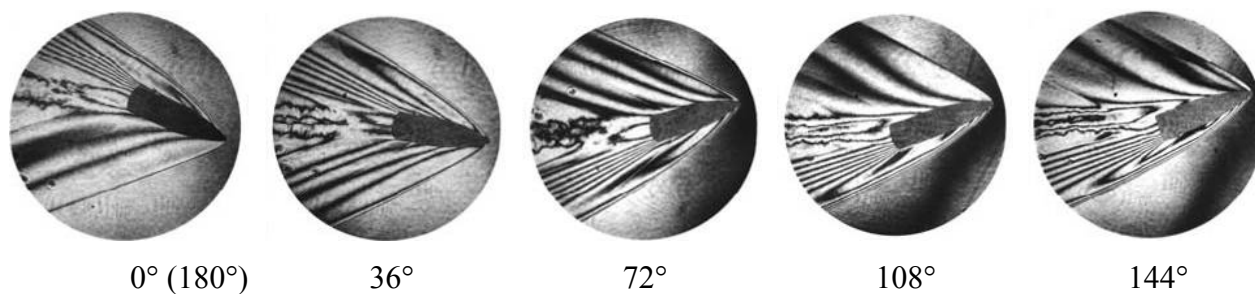


Рис. 21 а. Интерферограммы пространственного газового течения около цилиндрической модели с конической головной частью. Настройка на бесконечно широкую полосу. Среда – воздух; скорость – $M = 2,6$; угол атаки – 26° ; угол скольжения 14° ; углы наблюдения указаны на снимках.

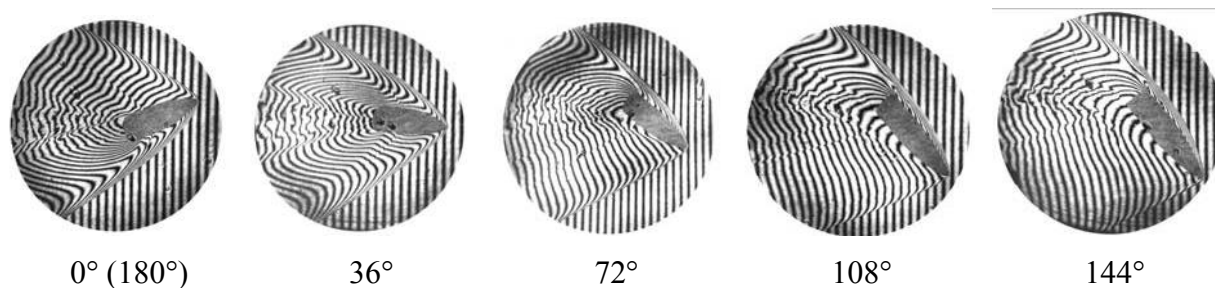


Рис. 21 б. Настройка на полосы конечной ширины. Угол атаки $\sim 45^\circ$.

К. Многоходовой голографический интерферометр с повышенной чувствительностью измерений

Исследования газовых потоков в аэробаллистической трассе при низких давлениях проводились с помощью голографического многоходового интерферометра сдвига (рис. 22), созданного на основе теневого прибора ИАБ-451. На голограммах регистрировались волновые поля при одно- и одиннадцатикратном просвечиваниях исследуемой зоны [13]. Для получения лучшего качества картин при восстановлении волн использовались копии голограмм на слое полиэфирной смолы.

На рис. 23 а,б приведены интерферограммы, образованные при взаимодействии волновых полей 0-го и 1-го порядков дифракции, восстановленных с копий голограмм, полученных при одно- и одиннадцатикратном просвечиваниях объекта. Интерферограммы, полученные при взаимодействии волновых полей ± 1 -ых и ± 2 -ых порядков дифракции, при одиннадцатикратном просвечивании, приведены на рис. 23в и 23г, соответственно. На рис. 23д-з приведены теневые картины, полученные по методу щели и ножа при восстановлении волновых полей

первых четырех порядков дифракции. Чувствительность измерений повышена в 11, 22, 44 и 66 раз, соответственно.

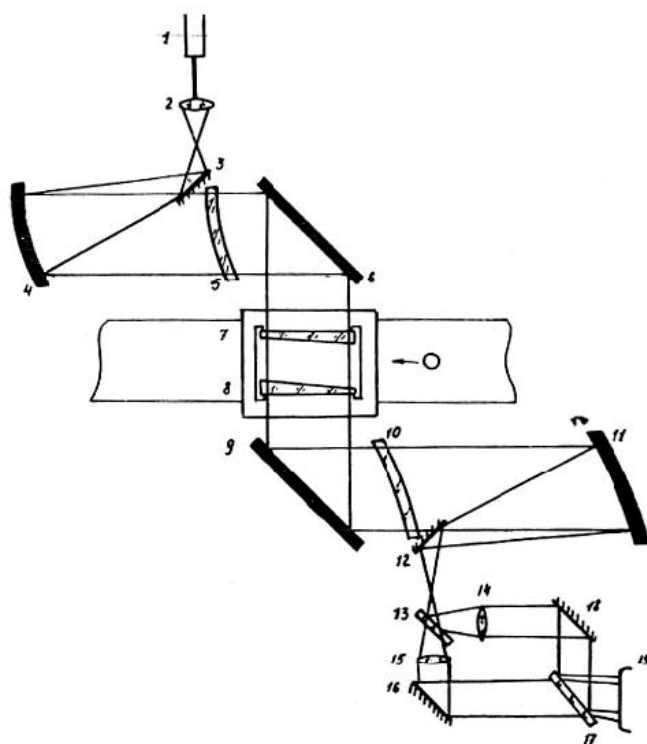


Рис. 22. Оптическая схема многоходового интерферометра сдвига.

1 – источник света; 2 – фокусирующий объектив; 4,5,10,11 – зеркально-менисковые объективы теневого прибора ИАБ-451; 3,6,9,12,16,18 – поворотные зеркала; 7,8 – светоделительные зеркала узла многократного просвечивания; 13,17 – светоделительные пластины; 14,15 – коллимирующие объективы; 19 – плоскость регистрации голограммы.

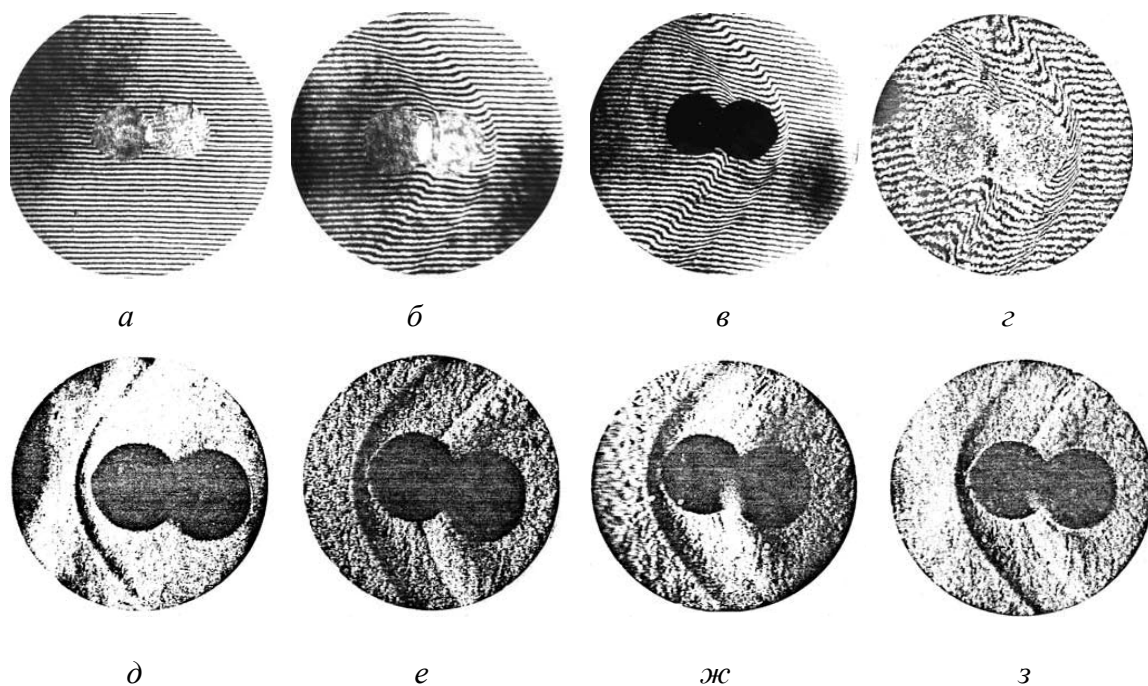


Рис. 23. Голографические интерферограммы поля плотности около сферической модели, полученные при взаимодействии волновых фронтов различных порядков дифракции и при различной кратности просвечивания. Аэробаллистическая трасса ФТИ им. А.Ф. Иоффе

- а) Однократное просвечивание: 0-й и 1-й порядки дифракции;
 б) Одиннадцатикратное просвечивание: 0-й и 1-й порядки дифракции;
 в) Одиннадцатикратное просвечивание: ± 1 -е порядки дифракции;
 г) Одиннадцатикратное просвечивание: ± 2 -е порядки дифракции

Голографические теневые картины поля плотности около сферической модели, полученные при различной чувствительности измерений. Аэробаллистическая трасса ФТИ им. А.Ф. Иоффе

- д) Чувствительность измерений повышена в 11 раз;
 е) Чувствительность измерений повышена в 22 раза;
 ж) Чувствительность измерений повышена в 44 раз;
 з) Чувствительность измерений повышена в 66 раз

Светосильные интерферометры и теневые приборы на основе голограммных оптических элементов

На основе достижений в области теории отображающих свойств голограмм, в разработку которой внесли огромный вклад акад. Ю.Н. Денисюк и сотрудники ГИПО д.т.н. К.С. Мустафин, д.т.н. Лукин А.В. [14,15], сделана попытка создания ряда интерференционных и теневых приборов нового класса – на основе использования голограммных оптических элементов (ГОЭ) и синтезированных (компьютерных) голограммных оптических элементов (СГОЭ) в качестве основных объективов – с диаметром рабочего поля 230, 400, 800 м с предельно высокими значениями относительного отверстия (от 1:3,5 до 1:2 и даже до 1:1).

Данная технология привлекает тем, что она обеспечивает высокое оптическое качество, широкие корректирующие возможности, простоту и сравнительно невысокую стоимость изготовления и тиражирования синтезированных ГОЭ (реализуются методы и средства фотолитографии; тиражирование осуществляется путем получения отпечатков рельефно-фазовой структуры ГОЭ – матрицы в слоях полиэфирной смолы холодного отверждения).

Выбор оптической схемы основных объективов высокоапертурных интерферометров и теневого прибора и корректоров, компенсирующих остаточные аберрации приборов, проводится, исходя из конкретных возможностей имеющихся технологических средств. Наиболее целесообразным было бы использование в качестве основных объективов синтезированных голограмм, являющихся безабберационными для выбранной длины волны. Однако в настоящее время технология обеспечивает синтез голограммных оптических элементов диаметром только до 230 мм. При этом достижимая максимальная частота штрихов (колец) до 200 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.

Оптические системы таких приборов отличает высокая компактность, что позволяет существенно сократить производственные площади, необходимые для их размещения. Более того, 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 (иллюминаторы) газодинамической установки, что позволяет вдвое сократить количество используемых крупногабаритных оптических элементов.

На рис. 24 представлены основные варианты принципиальных схемных решений объективной ветви интерференционно-теневого прибора, в которых синтезированные ГОЭ используются либо в качестве основных объективов (рис. 24а,б), либо компенсаторов (рис. 24в,г,д). При построении приборов возможно также и комбинированное применение таких объективов, поскольку их аберрационные характеристики имеют существенные отличия. С этой точки зрения в осветительной части интерферометра целесообразно использовать светосильные компактные варианты (рис. 24в,г,д), а в приемной – варианты, обеспечивающие лучшее качество изображения протяженных объектов (рис. 24а,б).

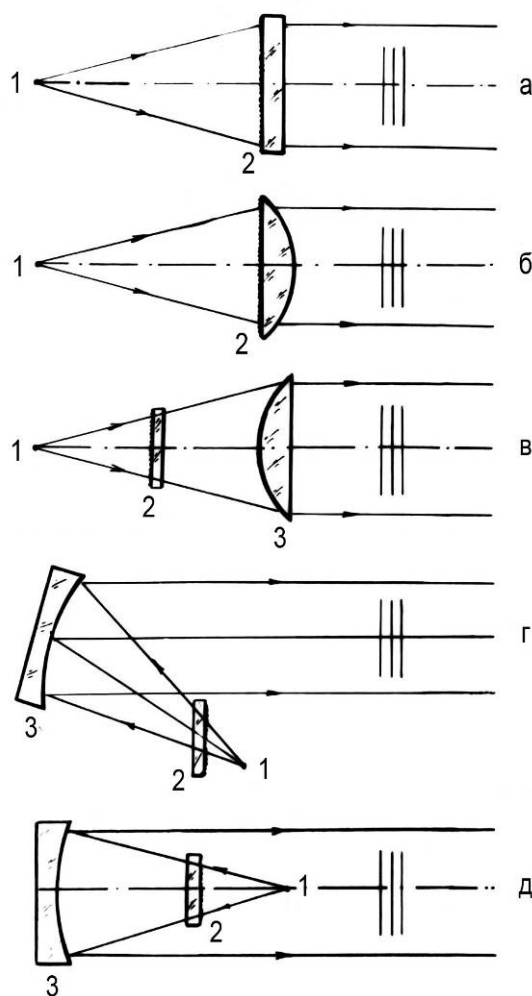


Рис. 24. Основные варианты оптических систем объектной ветви интерференционно-теневого прибора

При этом диапазон пространственных частот ГОЭ варьируется от нескольких десятков до нескольких сотен обратных миллиметров в зависимости от функции, которую ГОЭ выполняет в оптической системе интерференционно-теневого прибора, его относительного отверстия и светового диаметра.

На рис. 25а приведены частотные характеристики СГОЭ – объективов и голограммно-линзовых объективов диаметром 230 мм, в которых используются СГОЭ в качестве компенсаторов сферической aberrации. Из приведенных кривых 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 длины волны $\lambda = 694 \text{ нм}$.

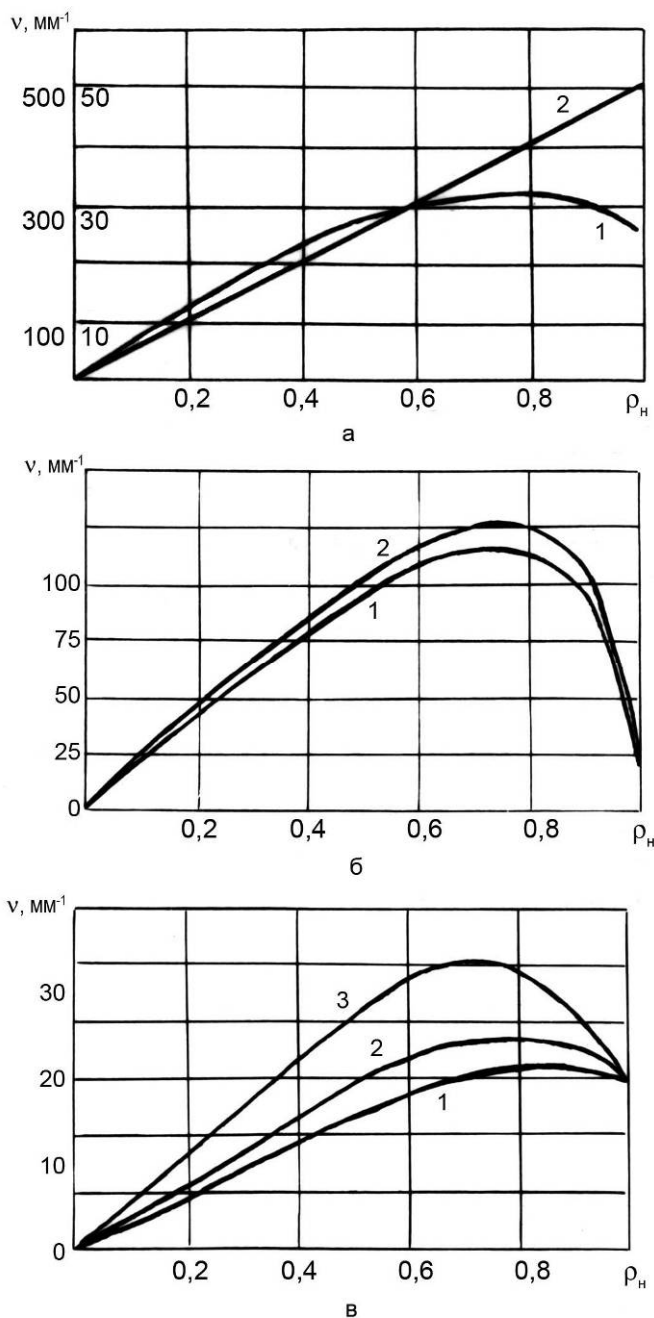


Рис. 25. Частотные характеристики голограммных оптических элементов, рассчитанные для различных диаметров световых полей (230 мм, 400 мм, 800 мм)

а) для оптической системы рис. 24а,б. Кривые 1,2 соответствуют световому диаметру 230 мм (1 – $0 \div 50 \text{ мм}^{-1}$, 2 – $0 \div 500 \text{ мм}^{-1}$);

б) для оптической системы рис. 24в. Кривая 1 – для светового диаметра 230 мм (диаметр голограммы 140 мм); кривая 2 – для светового диаметра 400 мм (диаметр голограммы 220 мм);

в) для оптической системы рис. 24д. Кривые 1,2,3, соответственно, для световых диаметров 230, 400, 800 мм; v – пространственная частота; ρ_n – нормированный радиус голограмм.

Аналогичные кривые для объективов диаметром 400 мм и диаметром 800 мм приведены на рис. 25б и 25в. Рассмотрены два положения линзового объектива относительно компенса-

тора. В первом случае линзовый объектив располагается выпуклой стороной к компенсатору, во втором – плоской. Кроме того, проведены расчеты голограммно-линзовых объективов диаметром 230, 400 и 800 мм при использовании компенсатора диаметром 100 мм. Определены допуски на смещение голограммы – компенсатора диаметром 100 и 200 мм. Для компенсатора диаметром 100 мм они не превышают 0,001 мм.

Результаты расчетов 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 объектива 1:3. В перспективе возможно использование более совершенного технологического оборудования, которое позволит получать ГОЭ диаметром до 500 мм и частотой до 1500 мм^{-1} .

Л. Интерферометр с полем визуализации диаметром 400 мм на основе СГОЭ

Интерферометр создан по четырехзеркальной схеме типа Цендера-Маха на основе двух встречно установленных основных объективов с узким эталонным пучком. Каждый объектив состоит из плоско-выпуклой линзы (световой диаметр 400 мм; радиус кривизны $R_{кр.} = 875 \text{ мм}$) и синтезированной голограммы – компенсатора (световой диаметр – 200 мм).

Принцип действия интерферометра заключается в следующем. Пучок от лазера 1 (рис. 26) зеркалом 2 направляется на светоделитель 3 (оптический клин), обеспечивающий разделение пучка на объектный и опорный.

Объектный пучок зеркалом 4 направляется на объектив 5, обеспечивающий равномерное освещение осветительного голограммно-линзового объектива 6,7 расходящимся объектным пучком. Плоско-выпуклая линза 7 совместно с голограммным компенсатором 6 формирует анаберрационный параллельный пучок (компенсатор 6 исправляет сферическую aberrацию линзы 7), просвечивающий рабочую зону 8 и падающий на плоско-выпуклую линзу 9, формирующую совместно с компенсатором 10 безабберационный волновой фронт (компенсатор 10 исправляет сферическую aberrацию линзы 9). Объектив 11 формирует из падающего на него объектного пучка параллельный пучок (световой диаметр 30 мм), падающий на светоделитель 12. Опорный пучок светоделителем 3 направляется в телескопическую систему 13, формирующую

рующую параллельный пучок (световой диаметр 45 мм), который зеркалом 14 направляется на светоделитель 12. Светоделитель 12 обеспечивает наложение объектного и опорного пучков, которые затем падают на зеркало 15 и направляются им на объектив 16, обеспечивающий оптическое сопряжение плоскости исследуемого объекта с плоскостью фоторегистрации 17.

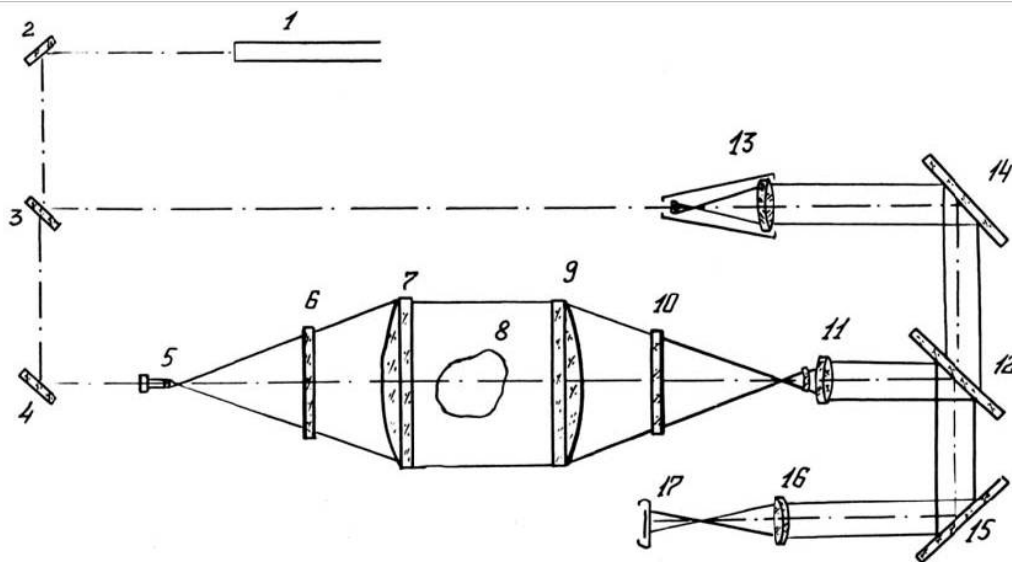


Рис. 26. Интерферометр по четырехзеркальной схеме на основе голограммно-линзовых объективов с полем визуализации диаметром 400 мм
1 – лазер; 2-4,14,15 – зеркала; 5 – микрообъектив; 6,10 – голограммные компенсаторы; 7,9 – плоско-выпуклые линзы диаметром 400 мм; 8 – фазовый объект; 11,16 – объективы; 12 – светоделитель; 13 – телескопическая система; 17 – регистрирующая среда.

М. Интерферометр на основе двух синтезированных голограммных линз

Разработанный на базе осевых синтезированных голограммных линз (световой диаметр 200 мм, $f = 1000$ мм) виброустойчивый интерференционно-теневого приор послужил основой при проведении исследований газодинамических течений в отражающем сопле ударной трубы 12. Оптическая схема прибора (рис. 27) строилась по схеме интерферометра типа Цендера-Маха с узким (световой диаметр 10 мм) пучком сравнения. Благодаря использованию в объектной ветви осевых синтезированных голограммных линз сечение светового пучка в объектной ветви прибора увеличивалось до диаметра 200 мм.

Одна из голограммных линз одновременно служила объективом прибора и защитным стеклом демпферного бака установки. Поскольку дифракционная эффективность голограммных линз составляла 30 %, светоделители 8 и 19 (рис. 27) выполнялись с коэффициентами

пропускания 92 % и 50 %, соответственно. Искажения интерференционных полос, обусловленные аберрациями и технологическими дефектами оптических элементов прибора, не превышали $0,2\lambda$. Вибрации, возникающие при запуске ударной трубы, несмотря на совмещение функции защитного стекла и основного объектива прибора, не оказывали сколько-нибудь заметного влияния на качество получаемых картин.

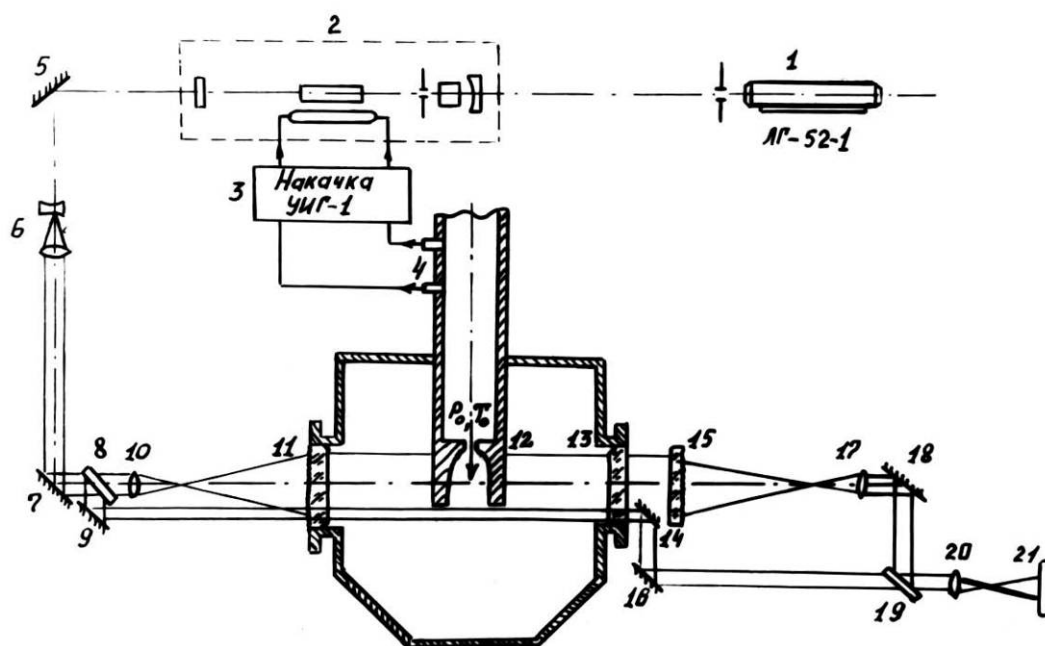


Рис. 27. Оптическая схема интерференционно-теневого прибора на базе осевых синтезированных голограммных линз (световой диаметр 200 мм; $f' = 1000$ мм)

1,2 – лазеры; 5,7,9,14,16,18 – зеркала; 6,10,12,20 – объективы; 8,19 – светоделители; 11,13 – голограммные линзы; 12 – сопло трубы; 15 – голограммный корректор; 21 – регистрирующая среда

Картини визуализации получены при различных режимах настройки прибора. Как в случае использования режима лазерного интерферометра, так и при настройке на голографические полосы, картины регистрировались на аэрофотопленку тип-22 при применении импульсного рубинового лазера. На рис. 28 приведены интерферограммы поля настройки (а) и газового потока (б) в сопле ударной трубы. Из рисунка видно, что искажение интерференционных полос составило $0,2$ периода полосы.

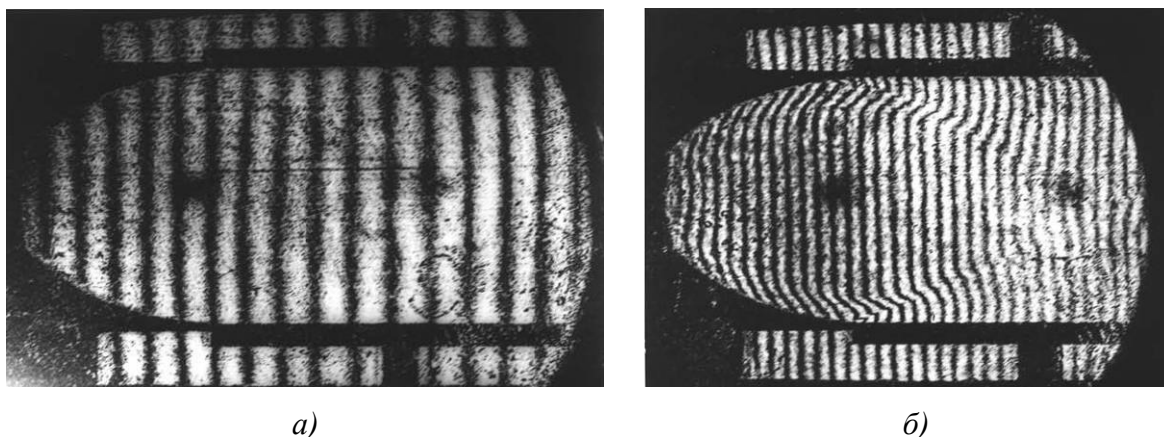


Рис. 28. Голографические интерферограммы, полученные на интерферометре с использованием осевых синтезированных голограммных линз
 а) настройка на полосы конечной ширины;
 б) газовый поток в сопле ударной трубы

Перспективы создания систем оптико-физических измерений с размером поля наблюдения более 1000 мм

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

На основе этого опыта создан экспериментальный образец интерферометра с голограммно-линзовым объективом с полем визуализации диаметром 800 мм; он представляет собой интерферометр типа Тваймана-Грина, в объектной ветви которого установлен голограммно-линзовый объектив, состоящий из плосковыпуклой линзы 7 (световой диаметр 800 мм, $R_{кр}$ 1506,6 мм) и голограммного компенсатора 6 (световой диаметр 200 мм) (рис. 29). Качество оптической системы объектной ветви интерферометра можно существенно скомпенсировать при голографической регистрации волновых фронтов.

На рис. 30 приведена интерферограмма, полученная методом двух отдельных голограмм, когда голограммы прижаты одна к другой, а настройка на полосы различной частоты и ориентации производится взаимным разворотом и смещением голограмм. Остаточная волновая aberrация составляет около $1 \div 2\lambda$.

Таким образом, на основе использования синтезированных ГОЭ возможно эффективное решение проблемы создания компактных интерференционных и теневых приборов с рабочим полем 230 мм, 400 мм, 800 мм и более с относительным отверстием не менее 1:3,5. Рассчитан, изготовлен и испытан зеркальный объектив с отражательной голограммой в качестве компен-

сатора с относительным отверстием 1:1,4. Это дает реальную надежду создать сравнительно компактные интерферометры с размером наблюдаемого поля 1000-1500 мм.

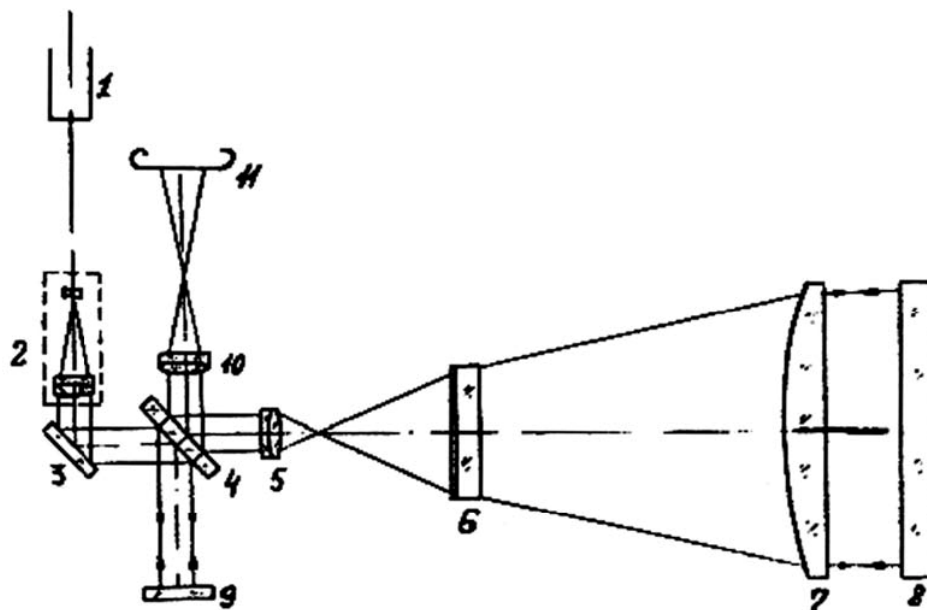


Рис. 29. Интерферометр Тваймана-Грина на основе голограммного компенсатора. Диаметр поля визуализации – 800 мм

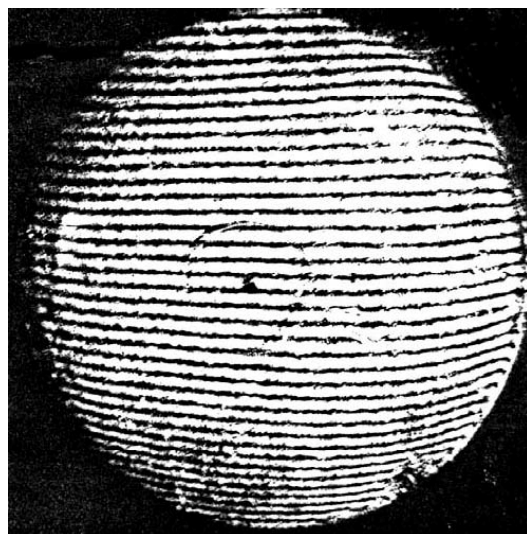


Рис. 30. Интерферограмма, характеризующая качество интерферометра с диаметром поля наблюдения 800 мм

Дальнейшее увеличение наблюдаемого поля систем ОФИ до 1500-2000 мм в диаметре, очевидно, возможно только на основе применения адаптивной оптики.

В этом направлении проведены первые исследования, закончившиеся созданием макета

теневого прибора с полем наблюдения диаметром 1500 мм. Использовалось многокомпонентное плоское зеркало и зеркальный объектив по схеме Кассергена. В качестве параболического использовалось 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.

С помощью голографической аппаратуры проведен ряд интересных, подчас уникальных газодинамических экспериментов.

Так, например, изучался процесс разрушения твердых материалов при воздействии на их поверхность ударника (диаметр 7,94 мм), движущегося со сверхзвуковой скоростью ($M_\infty = 2,5 \div 3,2$; среда – воздух) (рис. 31).

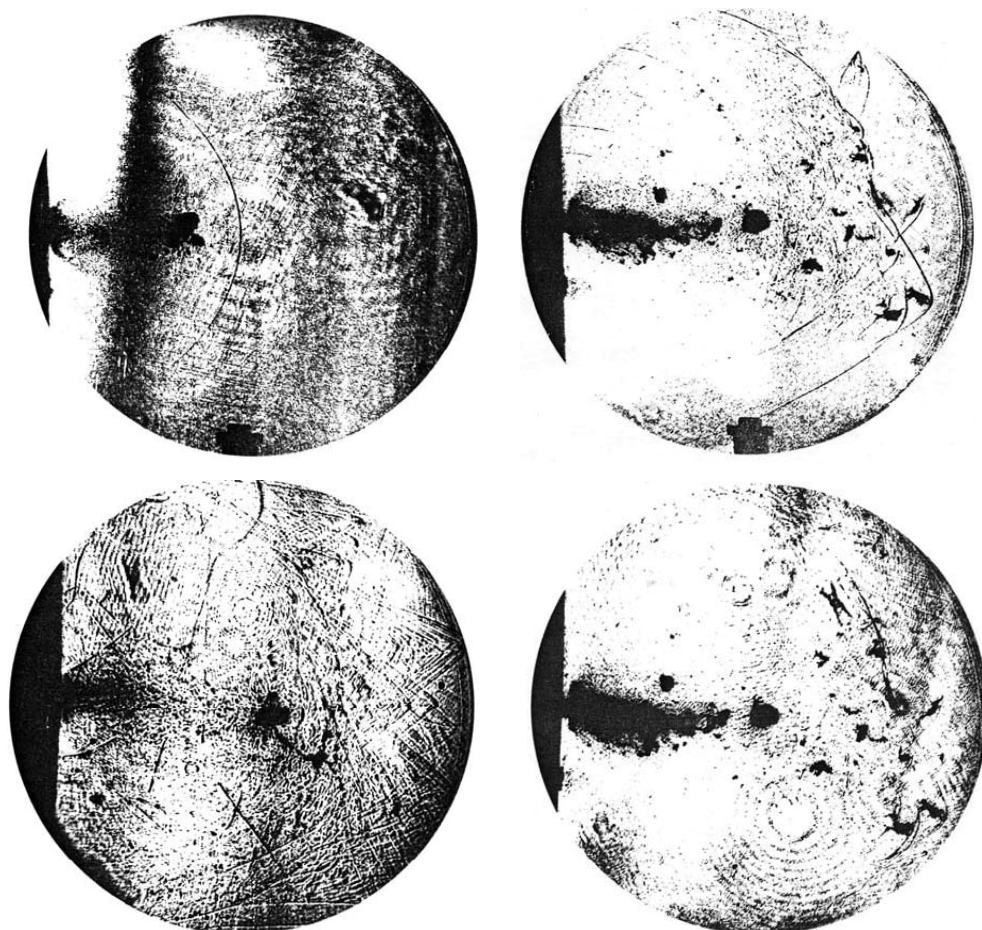


Рис. 31. Прямо-теньевые картины двухфазного потока "твердые частицы – воздух", полученные при изучении волновых фронтов, восстановленных с однократно экспонированных голограмм. Материал частиц – сталь, сплавы алюминия и титана. $V_0 = 820-1200$ м/с.

При восстановлении волн с голограммы измерены основные параметры структуры двухфазного потока: размеры частиц, координаты положения частиц, скорости и углы разлета частиц. Установлено, что отделению частиц от разрушившихся пластин предшествовал отход от поверхности последней интенсивной ударной волны со сферическим волновым фронтом. В ряде опытов эта волна обгонялась двухфазным потоком. Двухфазный поток состоит из лидирующей группы частиц, образующей перед собой в ряде опытов ударные волны и группу частиц, перемещающихся в спутном следе лидирующей группы без образования ударных волн.

В одном из экспериментов осуществлена визуализация частицы размером 7 мм, перемещающейся в направлении, противоположном потоку. Частица находилась в группе отстающих «дозвуковых» частиц и имела перед собой ударную волну, направленную в сторону пластины. Невоспроизводимость данного явления в других опытах, выполненных в процессе исследований, а также отсутствие каких-либо данных об этом явлении говорит, с одной стороны, о его редкости, с другой – подчеркивает уникальные возможности голографического метода при изучении и контроле потоков продуктов разрушения твердых материалов.

Для изучения двухфазного потока «газ – твердые частицы» (сверхзвуковое обтекание моделей в запыленном газе) на баллистическом стенде ФТИ им. А.Ф.Иоффе в качестве модели служил стальной шар диаметром 10 мм, скорость полета $M_\infty = 2,66$. Дисперсная фаза представляет собой порошок карбида бора, средний диаметр частиц ~ 100 мкм. Голограммы получали при массовой концентрации дисперсий фазы ~ 35 %. Картина обтекания сферы изображена на рис. 32а. На снимке отчетливо видны возмущения вблизи оси течения. На рис. 32б представлены картины области местного изменения формы головного скачка.

На рис. 33 изображена картина факела из форсунки диаметром 0,7 мм. Эти данные использовались для количественной и качественной оценки характеристик распыления компонентов различных смесей, что необходимо для оптимизации геометрических характеристик форсунок при проектировании энергетических установок.

На рис. 34, 35 приведены интерференционные и теневые картины обтекания тел сложной формы, полученные на аэробаллистической трассе НИИ ПММ при Томском Госуниверситете.

На рис. 36 показана интерференционная картина полос конечной ширины, характеризующая высокое качество волнового фронта в зоне резонатора мощного газодинамического лазера.

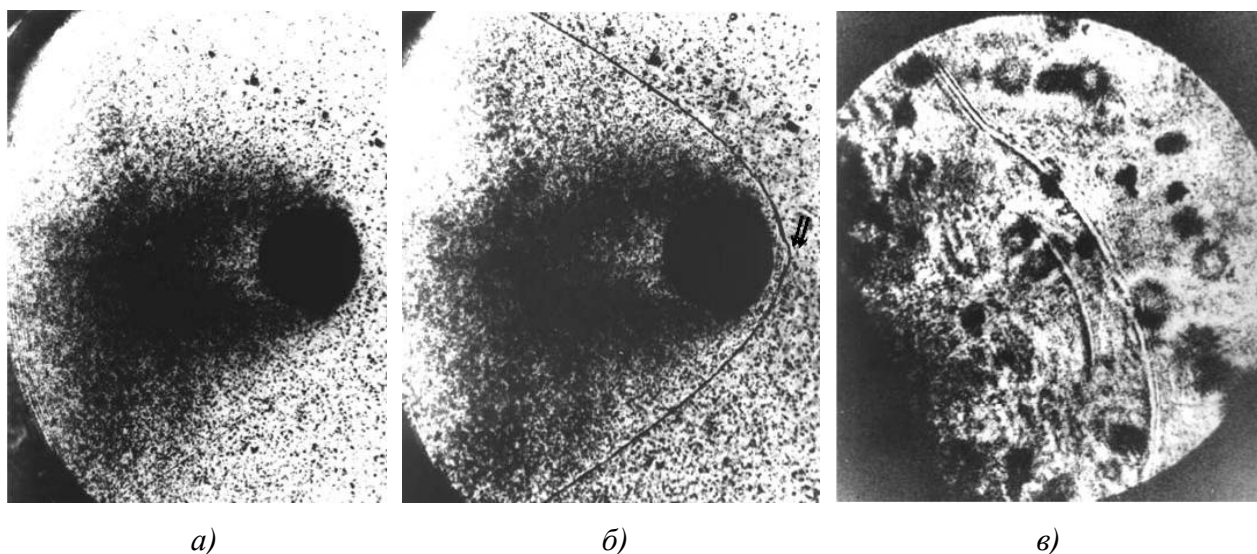


Рис. 32. Прямо-теневые картины обтекания летящей сферы сверхскоростным двухфазным потоком "газ – твердые частицы". Картины получены при восстановлении волн с голограмм, зарегистрированных в эксперименте на аэробаллистической трассе. Число Маха $\sim 2,66$.

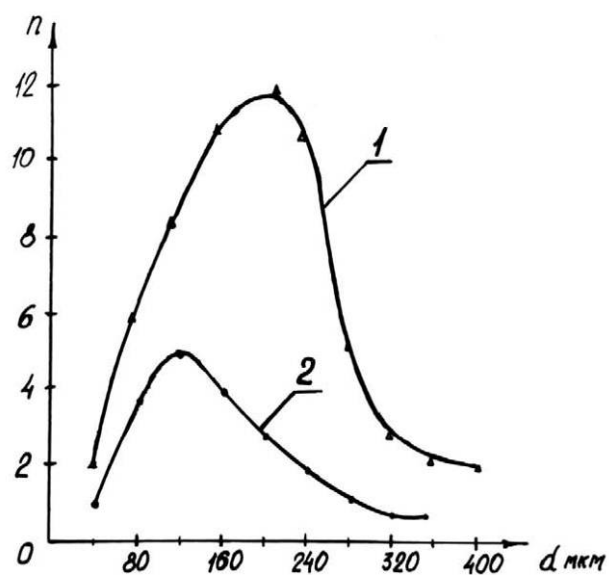
а) Оптическая система сфокусирована на центральное сечение рабочей зоны.

б) Картина, иллюстрирующая наличие скачка Маха на головной ударной волне. На снимке показаны (стрелками) парные частицы, вылетевшие в невозмущенную область.

в) Картина области местного изменения формы головного скачка. Видна внутренняя структура скачка Маха



а)



б)

Рис. 33. Прямо-теневая картина факела распыла на выходе центробежной форсунки диаметром 0,7 мм (а) и графики распределения частиц по размерам (б) для форсунок диаметром 0,7 мм (кривая 2) и диаметром 1,5 мм (кривая 1).

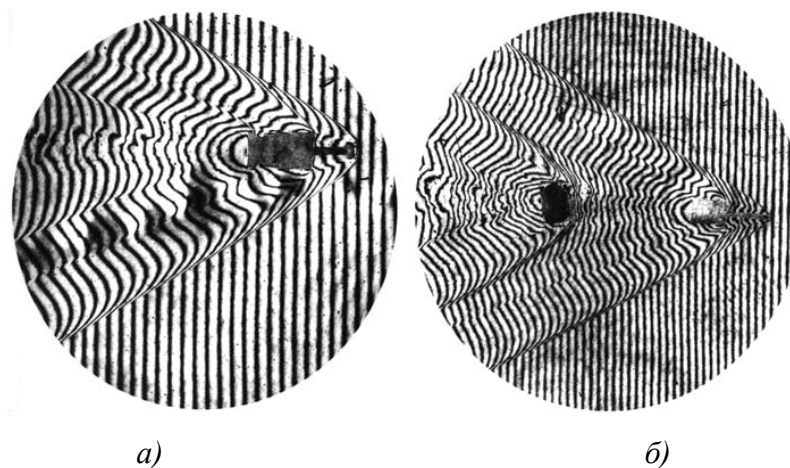


Рис. 34. Интерференционные картины обтекания тел сложной формы, полученные на аэробаллистической трассе. Настройка на полосы конечной ширины

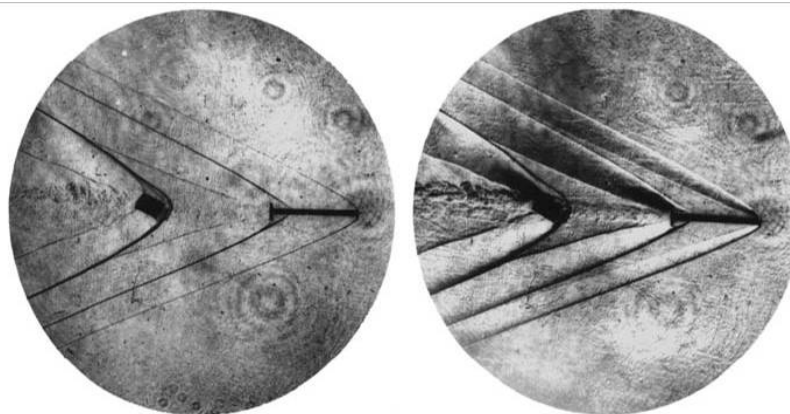


Рис. 35. Теневые картины обтекания тела, соответствующие различным положениям визуализирующего ножа относительно изображения точечного источника света.

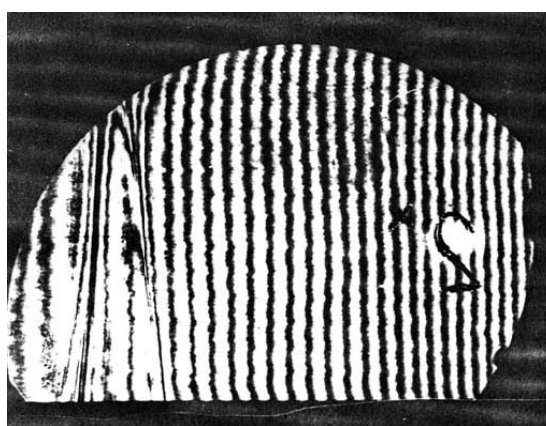


Рис. 36. Интерферограмма стабилизированного потока в зоне резонатора лазера

Н. На рис. 37 показана принципиальная оптическая схема **голографического устройства «острой» фокусировки** [16] для визуализации потоков в аэробаллистической трассе ФТИ

им. А.Ф.Иоффе по сечениям. Здесь W_2 – опорный, W_1 – объектный пучки. Пучок W_1 освещает растр 14. Дифрагированные на нем световые пучки проходят через рабочую зону 12,13 аэробаллистической трассы и регистрируются на голограмме. Элемент 11 представляет собой три голограммных нелинейных фазовых растра. Два из них имеют пространственные частоты 110 мм^{-1} , у третьего частота в два раза меньше. Растры установлены вплотную друг к другу. Путем соответствующей ориентации растров получаем равномерное распределение дифрагированных пучков по полю.

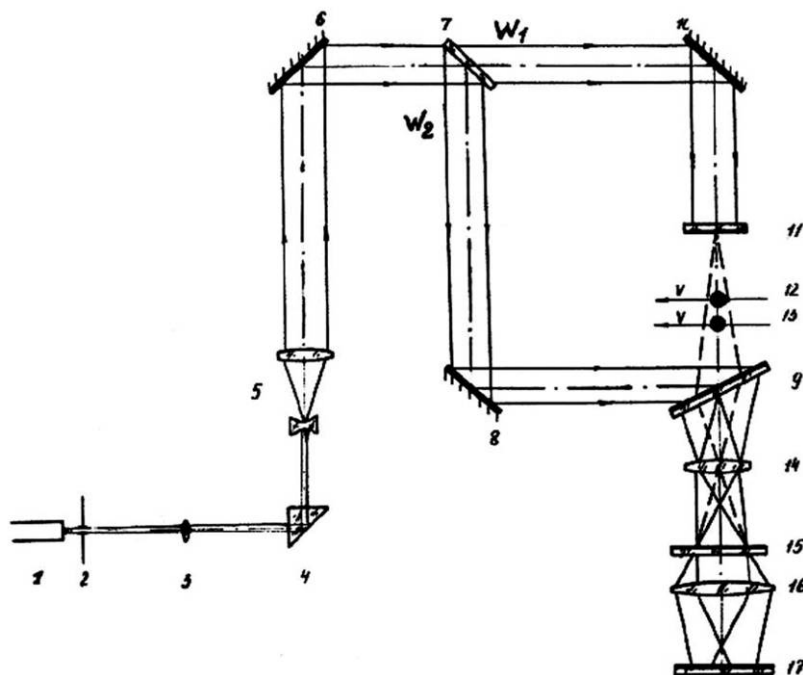


Рис. 37. Принципиальная оптическая схема голографического устройства для аэробаллистической трассы. 1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – линза; 4 – призма; 5 – коллиматор; 6,8,10 – зеркала; 7 – светоделитель; 9 – голограмма; 11 – растр; 12,13 – модели; 14,16 – объективы; 15 – визуализирующая диафрагма; 17 – фотопленка

С помощью этого устройства получили голограмму газодинамического течения около двух сферических моделей диаметром 9 мм, движущихся в аэробаллистической трассе, $M_\infty = 2,5$. Векторы скорости моделей были параллельны друг другу. По глубине визуализируемого пространства расстояние между центрами моделей изменялось в диапазоне от 35 до 40 мм. Траектории движения моделей были смещены по высоте на величину, равную 10 мм, причем, одна модель летела впереди другой на расстоянии, равном диаметру модели.

На рис. 38а,б,в приведены фотографии теневых картин течения около моделей, полученные с одной голограммы. Картина а) соответствует фокусировке системы на модель, расположенную по глубине наблюдения на большем расстоянии от голограммы. Снимок б) получен

при фокусировке системы на плоскость между моделями. Теневая картина *в*) соответствует фокусировке системы на модель, расположенную по глубине ближе к плоскости голограммы. Расстояние между центрами моделей в этом случае составляет 35 мм. На рис. 38*г* показана теневая картина течения, полученная обычным способом. Из фотографий *а*) и *в*) видно, что голографическое устройство позволяет визуализировать по глубине течение около каждой модели в сложном газодинамическом потоке. При этом практически полностью исключается влияние течений друг на друга. На снимках *а*) и *в*) скачки плотности не имеют разрывов в области взаимодействия газодинамических течений.

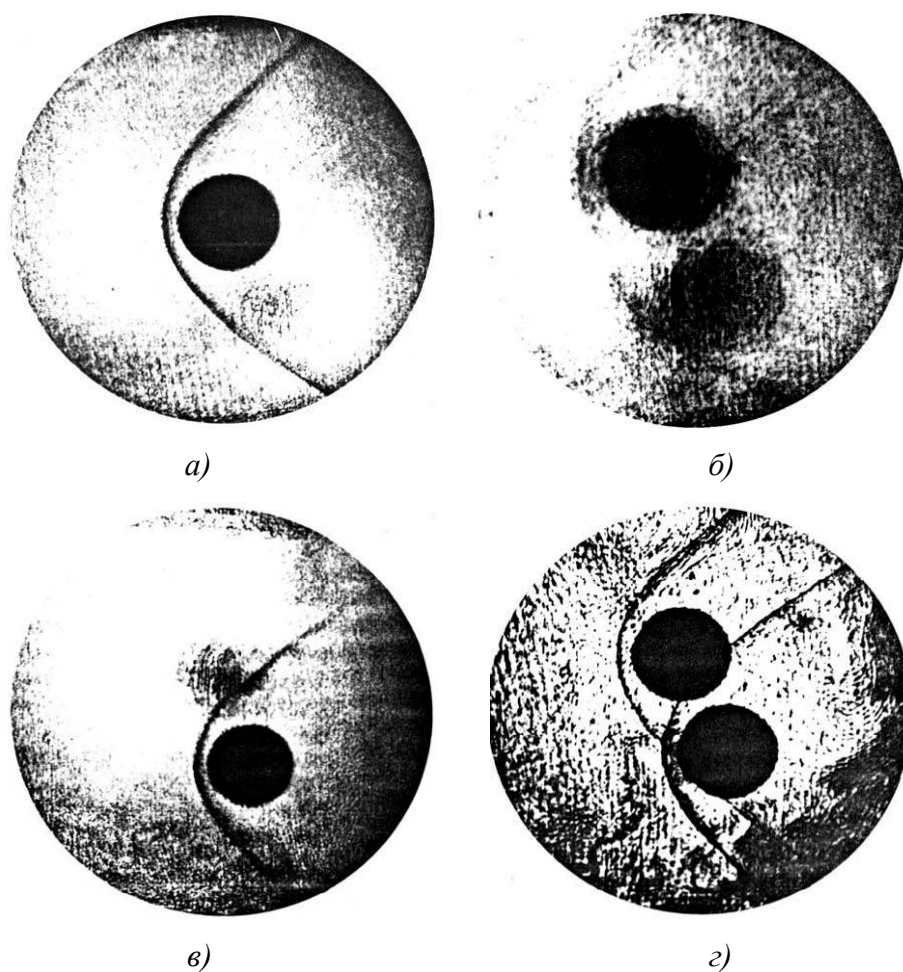


Рис. 38. *а*), *б*), *в*) Теневые картины течения около летящих моделей, соответствующие трем плоскостям фокусировки при восстановлении волновых полей с голограмм, полученных в оптической системе "острой" фокусировки:

а) плоскость модели, максимально удаленной от голограммы;

б) плоскость расположена между моделями;

в) плоскость модели, минимально удаленной от голограммы;

г) – теневая картина обтекания двух моделей, полученная с помощью обычного теневого метода

Разработанные голографические теневые методы «острой» фокусировки и схемы аппаратуры применимы для визуализации по глубине сложных газодинамических течений, взаимодействия ударных волн, изучения пограничных слоев, процессов горения и смешивания компонентов топлив и т.д. Одним из возможных практических приложений метода могут служить исследования в аэродинамических трубах и плазменных установках, когда необходимо исключить влияние защитных стекол, подверженных значительному нагреву. Применение этой технологии позволит существенно уменьшить требования к качеству защитных стекол, что особенно важно при создании систем ОФИ с большими размерами поля визуализации.

Широкая экспериментальная проверка голографических методов и приборов на аэродинамических трубах и баллистических установках показала возможности существенного упрощения газодинамического эксперимента, введения новых технологий его организации и проведения, получения в одном эксперименте многократно увеличенного объема информации, выполнения целого ряда новых исследований, ранее недоступных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физические измерения в газовой динамике и при горении. Сб. под редакцией Р. Ладенбурга. – М.: ИИЛ, 1957. – 484 с.
2. Leith E.N., Upatnieks Ju. New techniques in wavefront reconstruction. – Journal of the Optical Society of America. – 1961. – vol. 51, № 10. – p. 1469-1473.
3. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянно-го им излучения. – Доклады академии наук СССР. – 1962. – т. 144, № 6. – с. 1275-1278.
4. Белозеров А.Ф., Черных В.Т. Получение голограммы с оптическим изображением при обтекании тела газовым потоком на интерферометре Маха-Цендера. – Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. 28, вып. 5. – с. 1022-1025.
5. Белозеров А.Ф., Спорник Н.М. Получение теневых снимков при восстановлении волнового фронта с голограммы в белом свете. – Опτικο-механическая промышленность, 1971, № 3. – с. 9-11.
6. Belozarov A.F., Bereskin A.N., Razumovskaya A.J., Spornik N.M. Aeroballistic gas flow investigation using holographic device to schlieren system. – 10-eme Congres International de cinematographie ultrarapide. Comtes Rendus, Nice, France, 1972.
7. Белозеров А.Ф., Еньшин А.В., Зайцев В.Т., Зейликович И.С., Спорник Н.М. Применение голографического интерферометра с опорной волной, сформированной из объектной, в баллистическом эксперименте. – Журнал технической физики, 1976. – Т. XLVI, № 10. – с. 1987-1989.
8. Белозеров А.Ф., Кузилин Ю.Е. Голографический интерферометр на основе сферических зеркал. – Опτικο-механическая промышленность, 1971. – № 12. – с. 39-41.
9. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н., Зейликович И.С., Мустафина Л.Т., Разумовская А.И., Спорник Н.М., Черных В.Т. Голографическая интерферометрия фазовых объектов – Л.: «Наука», 1979. – 232 с.
10. Белозеров А.Ф., Махмутов Э.Р., Спорник Н.М. О коррекции оптических систем теневых и интерференционных приборов с помощью голограммы. – В сб. «Проблемы голографии». Издание Московского института радиотехники, электроники, автоматики, 1973. – Вып. III. – с. 46-49.
11. Турыгин И.А. Прикладная оптика. М.: «Машиностроение», 1966. – 431 с.
12. Белозеров А.Ф., Черных В.Т. О получении голографических интерферограмм под раз-

ными углами при диффузном освещении пространственного фазового объекта. – Сб.: «Оптическая голография» под ред. Ю.Н. Денисюка. – Л.: Изд. Ленинградского дома научно-технической пропаганды, 1972. – с. 66-72.

13. Белозеров А.Ф., Березкин А.Н., Мустафина Л.Т., Разумовская А.И. Об использовании многоходового голографического интерферометра для визуализации газовых потоков низкой плотности. – Письма в Журнал технической физики, 1978. – Т. 4, вып. 9. – с. 522-525.

14. Мустафин К.С. Голография и оптическое приборостроение. – В сб.: «Современное состояние и перспективы развития голографии». Л.: «Наука», 1974. – с. 163-178.

15. Лукин А.В. Синтезированные голограммы и их применение в оптическом приборостроении. – Межвузовский сб. «Оптическая запись и обработка информации». Издание Куйбышевского авиационного института, 1986. – с. 5-16.

16. Зелинский И.Н. Методы многолучевой голографической интерферометрии для изучения несимметричных газовых течений. Автореферат диссертации кандидата физико-математических наук. Томск: Томский Государственный университет. – 1987.