

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ МЕТОДОМ ТАЛЬБОТ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Ю. П. Войнов, Г. М. Зуев, А. С. Коряковский,
В. М. Марченко, Л. А. Михальцов, Н. Н. Поляшев

УДК 535.326

Методом Тальбот-интерферометрии исследованы оптические неоднородности аэродинамического потока. Измерены фазовые искажения волнового фронта в потоке.

1. Исследование оптических неоднородностей в газодинамических потоках интересно, в частности, с точки зрения уменьшения возмущений при использовании потоков в оптических трактах.

Источниками оптических фазовых неоднородностей являются градиенты показателя преломления $n(r)$. В газовых средах $n(r)$ определяется концентрацией частиц газа, а также его химическим составом /1/

$$n^2(r) = 1 + 4\pi \sum_1 N_1(r) \alpha_1, \quad (1)$$

где $N_1(r)$ - концентрация частиц i -ой компоненты газа, α_1 - коэффициент поляризуемости частиц, r - пространственная координата.

Концентрация частиц в свою очередь зависит от давления и температуры

$$P(r) = k \sum_1 N_1(r) T(r). \quad (2)$$

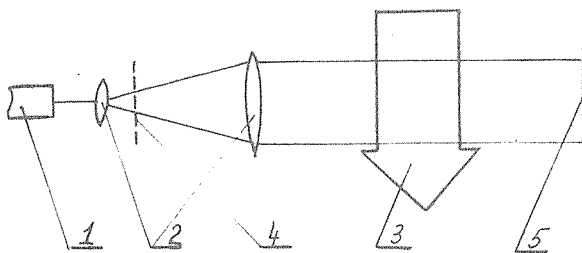
Из (1) и (2) следует, что градиенты показателя преломления возникают из-за неоднородного распределения давления и температуры по объему газа, что может быть обусловлено аэродинамическими свойствами каналов, по которым течет газ, взаимодейст-

вием элементарных струй, процессами в пограничных, неоднородным энерговкладом в поток, а также неоднородностью химического состава. Изменение формы волнового фронта на выходе из исследуемого объекта дает информацию о распределении неоднородностей по потоку.

Поскольку амплитуда и характерный размер неоднородностей охватывают широкий диапазон величин, то методы измерения формы волнового фронта должны обладать соответствующей точностью и пространственным разрешением. Кроме того, газодинамические потоки создают значительные механические возмущения, например, вибрации, в связи с чем методы должны быть работоспособными в этих условиях.

В настоящей работе демонстрируется эффективность использования метода Тальбот-интерферометрии /2/ для измерений искажений волнового фронта в газодинамическом потоке.

2. Исследования искажений волнового фронта проводились на аэродинамическом потоке прямоугольного сечения. Схема измерения приведена на рис. 1. Излучение He-Ne лазера (1) расширялось телескопом (2) до размера 15 см и пропускалось через поток (3). В расходящемся пучке устанавливалась двумерная решетка с периодом 1 мм (4). Регистрация тальботграммы осуществлялась в плоскости воспроизведения кинокамерой (5) с выдержкой 10^{-3} с и скоростью 1-2 кадр/с. Изменение периода в плоскости регистрации r_T достигалось перемещением решетки вдоль оси Z в расходящемся пучке.



Р и с. 1. Схема измерения оптических неоднородностей в аэродинамическом потоке

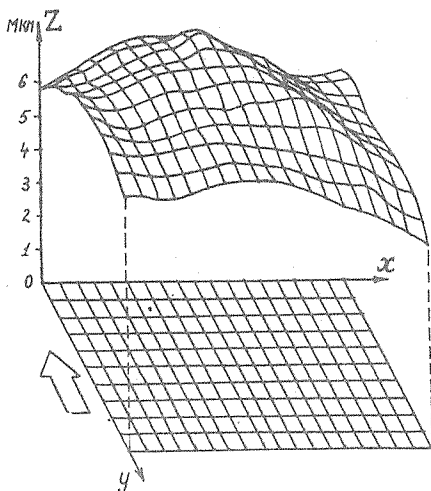
Измеряемыми величинами являлись смещения световых пятен на тальбограмме, по которым определялись локальные наклоны волнового фронта. Точность измерения координаты пятна ограничивалась сильным размытием границ и составляла ~ 50 мкм, что соответствует точности определения величины нормального уклонения волнового фронта $5 \cdot 10^{-2}$ мкм.

Зарегистрированные тальбограммы существенно изменялись при изменении режима течения. В установившемся режиме тальбограмма представляла собой набор смещенных относительно невозмущенного состояния световых пятен, контрастность границ которых уменьшалась вдоль по потоку. Соответственно возрастала и фоновая засветка.

Если характерный масштаб неоднородности больше r_x , то тальбограмма контрастна. Снижение контрастности свидетельствует о наличии неоднородностей с характерным размером, меньшим r_x . Анализ тальбограммы показал, что эквивалентной оптической схемой исследованного аэродинамического потока является фазовая пластинка с характерными масштабами неоднородностей как больше, так и меньше r_x . Размытие тальбограммы объясняется, по-видимому, развитием мелкомасштабной турбулентности в области входа в диффузор, т.е. рассогласованием потока.

Методом Тальбот-интерферометрии были измерены крупномасштабные неоднородности. На рис. 2 представлена фазовая поверхность искаженного потоком волнового фронта (направление газового потока показано стрелкой, зондирующее излучение распространялось по оси Z). Заметим, что при построении фазовой поверхности (интегрировании наклонов волнового фронта) ошибка может накапливаться. Чтобы оценить этот эффект, допустим, что при каждом измерении ошибка может принимать с равной вероятностью только два значения $\pm 0,5 \cdot 10^{-5}$ см. Тогда, используя биномиальный закон распределения вероятностей, получим, что при 9 шагах интегрирования (волновой фронт строился из центра) накопленная ошибка с вероятностью 82% не превышала $1,5 \cdot 10^{-5}$ см, а с вероятностью 94% была меньше $2,5 \cdot 10^{-5}$ см. При этом амплитуда измеренных искажений была $\sim 2,5 \cdot 10^{-4}$ см (рис. 2).

Если считать температуру и давление в потоке постоянными, то искажения вносит главным образом модуляция границ потока.



Р и с. 2. Фазовые искажения волнового фронта, внесенные потоком

В нашем случае начальное давление и температура $P_0 = 10$ атм, $T_0 = 280$ К. В пренебрежении возмущениями атмосферой при числе Маха $M = 2,5$ поток на срезе сопла характеризуется $\rho_0/T = 125$ К, $P = 0,7$ атм.

Модуляция границ потока с амплитудой l за счет изменения толщины потока приводит к изменению оптического пути $\Delta = (n_{\text{атм}} - n_{\text{пот}})l$, где $n_{\text{атм}} = 1,000276$, $n_{\text{пот}} = 1,000445$ для $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-4}$ см.

Модуляции волнового фронта с амплитудой $\sim 2,5$ мкм соответствует изменение толщины потока $\sim 1,5$ см.

Метод Тальбот-интерферометрии является количественным и удобен для диагностики и регулирования оптического качества газовых потоков путем изменения режимов течения. Пространственное разрешение и чувствительность схемы варьируются изменением периода распределения интенсивности в зондирующем пучке и изменением базы измерения и позволяет измерять деформации волнового фронта от долей до десятков микрон. Смещения решетки из-за вибраций не приводят к искажению результатов измерения, если

период вибраций больше времени экспозиции, поскольку взаимное расположение световых пятен при этом существенно не меняется.

Поступила в редакцию
7 июня 1983 г.

Л и т е р а т у р а

1. М. Борн, Э. Вольф, Основы оптики, "Наука", М., 1973 г.
2. А. С. Коряковский, В. М. Марченко, ЖТФ, 51, 1432 (1981);
Препринт ФИАН № 10, М., 1983 г.
3. Р. Н. Абрамович, Прикладная газовая динамика, "Наука", М.,
1969 г.