

- (Обзоры по электронной технике. Сер. 8. Управление качеством, метрология и стандартизация).
4. **Автоматический анализ сложных изображений:** Сб. пер./Под ред. Э. М. Бравермана.— М.: Мир, 1969.
 5. **Загоруйко Н. Г.** Методы распознавания и их применение.— М.: Сов. радио, 1972.
 6. **Васильев В. И.** Распознающие системы.— Киев: Наукова думка, 1969.
 7. **Нежевенко Е. С., Твердохлеб П. Е.** Линейный обучаемый классификатор оптических изображений.— Автометрия, 1971, № 3.
 8. **Дубицкий Л. Г., Розиньков Н. С.** Применение Фурье-голограммы для определения степени дефектности сварных и паяных швов корпусов интегральных схем.— Дефектоскопия, 1978, № 5.
 9. **Блок А. С., Карпов Л. П., Крупицкий Э. И.** Безлинзовая мультипликация изображений и их пространственных частотных спектров с помощью голограммы Френеля.— Опт. и спектр., 1972, т. 83, № 1.
 10. **Vander Lugt A.** Signal Detection by Complex Spatial Filtering.— IEEE Trans. Inform. Theory, apr. 1964, vol. IT-10.
 11. **Кукаров Г. В., Протасевич В. И., Прякин Ю. А.** О возможном способе реализации «инвариантного» голографического фильтра.— Автометрия, 1976, № 3.

*Поступила в редакцию 25 июля 1978 г.;
окончательный вариант — 26 марта 1979 г.*

УДК 621.373.826

**В. Н. БЫКОВ, О. Н. ЕРТАНОВА, Ю. В. ЗУЕВ,
М. Е. ЛАВРЕНТЬЕВ, И. А. ЛЕПЕШИНСКИЙ**
(Ленинград — Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГОЛОГРАММ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Сложность исследования и диагностики двухфазных потоков, обусловленная разнообразием структур и типов течения, широким диапазоном размеров дисперсной фазы и скоростей их движения, полидисперсностью, неравномерностью и нестационарностью таких потоков, требует использования современных более точных и информативных методов исследования, к числу которых можно отнести голографические методы [1—3]. Голография позволяет определять как дисперсную структуру потока, так и его динамические характеристики. В данной работе нас будут интересовать лишь дисперсная фаза и следующие ее характеристики: средний размер частиц, распределение частиц по размерам, счетная концентрация частиц. Здесь и далее под частицами подразумевается дискретная фаза (капли в газе, пузырьки в жидкости и т. п.).

В настоящее время для съема и обработки голографической информации об ансамблях микрообъектов, аналогичных дисперсной фазе двухфазного потока, используются методы фотометрирования непосредственно голограммы при помощи микроденситометра [4], методы обработки восстановленного с голограмм изображения микрообъектов [2, 5, 6], методы когерентно-оптической согласованной фильтрации при помощи го-

логографических фильтров [7]. Их общими и существенными недостатками являются трудоемкость и ограниченность по размерам и концентрации микрообъектов ($10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$). Кроме того, эти методы обработки дают локальные значения характеристик дисперсной структуры. Следовательно, для получения интересующих нас характеристик дисперсной фазы, являющихся интегральными по какому-либо выделенному объему, при использовании существующих методов обработки голографической информации следует пройти две стадии: снятие локальных значений в выделенном объеме и последующее их осреднение, что удлиняет и усложняет и без того трудоемкий процесс получения данных с голограмм.

Поэтому с целью ускорения измерения интегральных характеристик дисперсной фазы двухфазного потока, а также расширения диапазона концентраций регистрируемых частиц в область больших значений (до $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$) нами было предложено использовать для обработки голограмм двухфазного потока хорошо разработанный и широко применяемый метод светорассеяния под малыми углами, известный как метод малых углов (ММУ) [8].

ММУ предназначен для измерения спектра размеров сферических грубодисперсных частиц в области параметра дифракции $\rho = 2\pi r/\lambda \gg 1$, где r — радиус частицы, λ — длина волны падающего излучения. Суть ММУ заключается в экспериментальном измерении интенсивности рассеянного частицами света (индикатрисы рассеяния) и последующей аналитической обработке полученных данных с целью определения функции распределения частиц по размерам. Снятие индикатрисы рассеяния, как правило, осуществляется в фокальной плоскости положительной линзы, расположенной за исследуемым объемом частиц.

Предлагаемый нами подход заключается в измерении индикатрисы рассеяния не с потока, а с голограммы или восстановленного с нее изображения потока частиц и в последующем использовании математического аппарата ММУ. Основные требования, накладываемые ММУ на голографический процесс, сводятся к следующему:

1) частицы должны иметь сферическую форму и размер в диапазоне $\rho \gg 1$;

2) показатель преломления m должен удовлетворять условию $2|m - 1|\rho \gg 1$;

3) регистрация голограммы осуществляется в зоне дифракции Фраунгофера;

4) восстановленный с голограммы предметный волновой фронт идентичен первоначальному;

5) рассеяние должно быть однократным, так как основные результаты ММУ пока получены в этой области.

Поскольку ММУ разработан для некогерентного освещения, а при голографировании используется когерентное излучение, следует отметить различие в распределении интенсивности рассеянного света в зоне дифракции Фраунгофера для сферической частицы в случае когерентного и некогерентного освещений. Так, при когерентном освещении распределение интенсивности определяется как [9]

$$I(\mathbf{x}) = 1 - \frac{2kr^2}{z} \sin \frac{k|\mathbf{x}|}{2z} \Lambda_1\left(\frac{kr|\mathbf{x}|}{z}\right) + \frac{k^2r^4}{z^2} \left[\Lambda_1\left(\frac{kr(\mathbf{x})}{z}\right) \right]^2, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, $|\mathbf{x}|$ — координата в плоскости голограммы, z — расстояние от частицы до голограммы, Λ_1 — функция Бесселя 1-го рода, деленная на свой аргумент.

При некогерентном освещении [9]

$$I(\mathbf{x}) = 1 + (k^2r^4/z^2) [\Lambda_1(kr|\mathbf{x}|/z)]^2 \quad (2)$$

и отличается от (1) отсутствием интерференционного члена. Это отличие в распределении интенсивности рассеянного частицами света накладывает дополнительное требование ММУ к голографическому процессу. В работе [9] было показано, что вкладом интерференционного члена в индикатрису рассеяния при когерентном освещении для одиночной частицы можно пренебречь вплоть до размеров в 70 мкм. В этом случае применим математический аппарат ММУ [8] без дополнительных погрешностей.

В частности, для определения функции распределения частиц по размерам в двухфазном потоке нами использовалось уравнение вида [8]

$$f(\rho) = -\frac{2}{\rho^2} \int_0^{\infty} (\rho\beta) J_1(\rho\beta) Y_1(\rho\beta) \frac{d}{d\beta} \left[\frac{I(\beta)}{I_0} \pi\beta^3 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^3 \right] d\beta. \quad (3)$$

Здесь $f(\rho)$ — функция распределения частиц по размерам, β — угол наблюдения, $J_1(\rho\beta)$ — функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка, $Y_1(\rho\beta)$ — функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка, $I(\beta)$ — интенсивность рассеянного излучения, I_0 — интенсивность падающего излучения. Расчет $f(\rho)$ проводился путем численного интегрирования правой части выражения (3) на ЭВМ БЭСМ-4.

В настоящее время для голографирования частиц двухфазного потока используются однолучевая схема [2, 5] и различные модификации двухлучевой [1, 3]. Поэтому предложенный здесь способ обработки голограмм при помощи ММУ был опробован как на двухлучевых, так и на однолучевых голограммах.

Рассмотрим особенности такой обработки применительно к двухлучевым голограммам. Для регистрации двухфазного потока наибольшее распространение получила двухлучевая голографическая схема с пространственной фильтрацией предметного пучка, предложенная в работе [3]. При этом индикатриса рассеяния записывается на голограмме еще на стадии регистрации и восстанавливается независимо от изображения частиц в фокальной плоскости объектива. В данном случае измерение распределения интенсивности рассеянного частицами света можно провести путем сканирования восстановленной с голограммы фокальной плоскости объектива каким-либо фотоприемником.

Для более оперативной обработки голограмм нами было предложено регистрировать их непосредственно в фокальной плоскости объектива. При этом индикатриса рассеяния фиксируется в плоскости фотоэмульсии фотопластинки, и ее измерение можно провести путем фотометрирования непосредственно голограммы, исключая таким образом процесс восстановления. В данном случае необходимо, чтобы опорный пучок имел равномерную освещенность.

При применении ММУ к обработке однолучевых голограмм индикатриса рассеянного частицами света снимается в фокальной плоскости объектива, располагаемого за восстановленным с голограммы изображением потока частиц. При таком снятии индикатрисы рассеяния требование идентичности регистрируемого и восстановленного с голограммы предметного волнового фронта будет наиболее жестким. Апробация предложенного способа обработки голограмм ММУ была проведена на водовоздушной струе, создаваемой пневматической форсункой.

В случае двухлучевой схемы с пространственной фильтрацией [3] скорость газовой струи составила 50 м/с. По полученной голограмме определялась счетная концентрация частиц в объеме путем обработки ее ММУ и измерения под микроскопом восстановленных с нее изображений частиц. Полученные кривые приведены на рис. 1 (1 — визуальная обработка, 2 — обработка ММУ). По оси ординат отложена счетная концен-

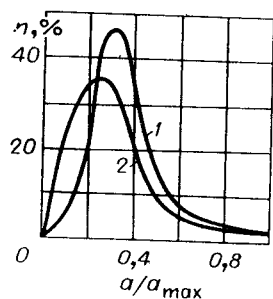


Рис. 1.

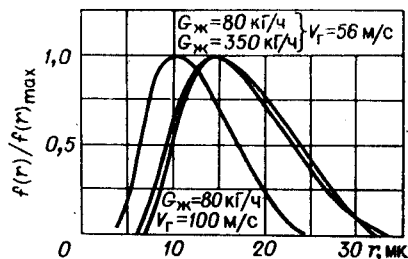


Рис. 2.

трация частиц в процентах, по оси абсцисс — относительный диаметр частиц. Сравнение кривых показывает, что погрешность измерения ММУ для среднего размера не превышает 20%, что соответствует точности ММУ.

Для оценки влияния голографического процесса и процесса фотохимической обработки голограмм на форму кривой распределения частиц по размерам была проведена следующая работа. При фиксированном режиме работы форсунки, создающей двухфазную струю, записывался ряд голограмм, которые после соответствующей фотохимической обработки имели различную степень плотности. В этом же режиме была снята кривая распределения частиц по размерам при непосредственном применении ММУ к потоку для некогерентного освещения. Эта кривая распределения сравнивалась с кривыми распределения, полученными при обработке ММУ ряда голограмм с различной степенью почернения. Сравнение кривых показало, что влияние фотохимической обработки, как и влияние замены потока частиц их голографическими изображениями, пренебрежимо мало в широких пределах.

Практическое приложение предложенного метода обработки голограмм проводилось на водовоздушной струе при скоростях газового потока до 150 м/с в однолучевой схеме. На рис. 2 представлены кривые распределения частиц по размерам для двух скоростей газовой фазы V_T и двух значений расходов жидкости $G_{ж}$. Из рисунка видно, что на форму кривой распределения оказывает существенное влияние скорость газового потока, в то время как влияние расхода жидкости в пределах точности эксперимента незначительно.

На основании большого числа расчетов кривых распределения частиц по размерам при различных значениях расхода воды и воздуха по соответствующим индикатрисам рассеяния, снятым с однолучевых голограмм, была получена связь между наиболее вероятным размером частиц в потоке и положением максимума функции

$$\varphi(\beta) = (d/d\beta) [(I(\beta)/I_0) \beta^3 (2\pi/\lambda)^3]$$

в зависимости от угла β , или, что то же самое, от линейной координаты l в фокальной плоскости линзы ($\beta = l/L$, где L — фокусное расстояние линзы). На рис. 3 дана эта зависимость. Следовательно, если распределение частиц по размерам подчиняется нормальному закону распределения, то положение наиболее вероятного размера частиц однозначно определяется абсциссой максимума $\varphi(\beta)$ от l . На рис. 4 зависимость наиболее вероятного размера частиц в двухфазном потоке представлена как функция скорости газового потока для различных расходов воды. Экспериментальные точки получены при непосредственном применении к потоку ММУ с когерентным и некогерентным источниками света (светлый кружок) и при обработке голограмм ММУ (черный кружок).

Для регистрации голограмм в однолучевой схеме использовалась фотопленка «Панхром Т-18», в двухлучевой — пленка ФПГВ-2.

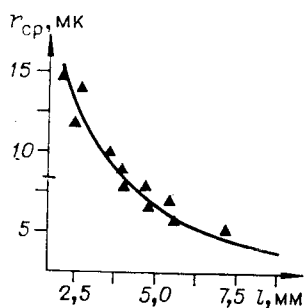


Рис. 3.

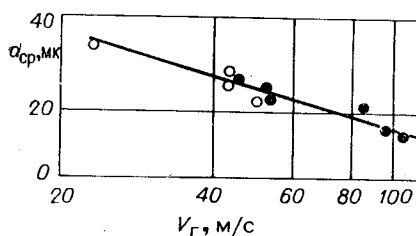


Рис. 4.

В заключение отметим, что полученные результаты в целом свидетельствуют о применимости методов рассеяния для автоматизации обработки голограмм двухфазного потока, а при больших концентрациях — о целесообразности использования этих методов. Вместе с тем необходима дальнейшая работа по уточнению погрешности метода, особенно в области малых значений размеров частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аладьев И. Т. и др. Исследование возможности применения голографии к изучению двухфазных течений.— Теплоэнергетика, 1973, № 8.
2. Палеев И. И., Агафонова Ф. А., Быков В. Н., Лаврентьев М. Е. Некоторые результаты исследования двухфазного потока методом однолучевой голографии Фраунгофера.— Энергомашиностроение, 1972, № 6.
3. Стаселько Д. И., Косниковский В. А. Голографическая регистрация пространственных ансамблей быстро движущихся частиц.— Опт. и спектр., 1973, т. 34, вып. 2.
4. Shofner F. M. et al. Fundamentals of Holographic Velocimetry.— In: Proc. 1969, Intern. Congr. on Instrum. in Aerospace Simulation Facilities. N. Y., May 1969.
5. Thompson B. J., Ward J. H., Zinky W. Application of Hologram Techniques for Particle Size Analysis.— Appl. Opt., 1967, vol. 6, p. 519.
6. Голография. Методы и аппаратура.— М.: Сов. радио, 1974.
7. Беккер А. М. и др. Автоматический корреляционный анализатор размеров бактериальных колоний.— В кн.: Материалы II Всесоюз. конф. по голографии, 1975, ч. 1.
8. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде.— М.: Гостехиздат, 1951.
9. Быков В. Н. Исследование образования и деформации спектра капель в двухфазных потоках методом голографии: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. мат. наук.— Л.: изд. ЛПИ, 1975.

Поступила в редакцию 25 марта 1977 г.;
окончательный вариант — 30 января 1978 г.

УДК 620.17 : 535.512

Л. А. БОРЫНЯК, С. И. ГЕРАСИМОВ, В. А. ЖИЛКИН

(Новосибирск)

ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАПИСИ И РАСШИФРОВКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НЕОБХОДИМУЮ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА ДЕФОРМАЦИЙ

В конце 60-х — начале 70-х годов голографическая интерферометрия завоевала широкую популярность, так как в это время казалось, что с ее помощью удастся с достаточно высокой точностью и довольно легко по сравнению с известными экспериментальными методами определять перемещения произвольных точек поверхности трехмерных объектов. Од-