

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ЧАСТИЦ МЕТОДАМИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Введение. Определение скорости потока частиц необходимо для решения ряда задач газодинамики двухфазных потоков [1]. В настоящее время для этой цели широко применяют лазерную технику, использующую эффект Доплера и методы скоростной регистрации изображений. Последние дают широкие возможности для применения апостериорной обработки изображений потоков, зафиксированных на голограмме или на фототранспаранте.

Двухфазный поток можно характеризовать тремя группами газодинамических параметров: параметрами, определяющими форму и размеры частиц; параметрами, обуславливающими положение и ориентацию частиц в потоке; параметрами поля скоростей, связанными с динамикой движения частиц. В общем случае эти системы параметров взаимосвязаны и, как правило, имеют статистическую природу. При регистрации методом многократной экспозиции динамика потока частиц кодируется в структуре изображения. При значительных концентрациях частиц в потоке структура изображения, зарегистрированного на голограмме или фототранспаранте, довольно сложна, что существенно затрудняет получение достоверных результатов при визуальном анализе изображений [2]. В связи с этим представляется перспективным применение пространственно-спектральных методов анализа структуры изображений для обработки многоэкспозиционных изображений двухфазных потоков [3]. Основные черты рассматриваемого подхода к определению динамики потока частиц не зависят от вида предъявляемого многоэкспозиционного изображения (голограммы или фототранспаранты), поэтому ниже рассматривается случай, когда это изображение зафиксировано на фототранспаранте. Случай с голографической фиксацией изображения рассмотрен в [4—6]. При практической реализации метода операцию получения пространственного спектра многоэкспозиционного изображения целесообразно выполнять оптически, а анализ спектра проводить цифровыми методами. Как будет показано ниже, пространственно-спектральный подход позволяет сравнительно просто определять статистические характеристики скорости потока частиц (среднюю скорость и ее дисперсию) в условиях, когда визуальный анализ изображения практически не возможен.

Пространственный спектр многоэкспозиционного изображения потока частиц. Многоэкспозиционное изображение потока частиц можно представить в общем случае в виде функции $f(\mathbf{r})$ [7]:

$$f(\mathbf{r}) = \int f_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') P(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (1)$$

где f_0 — функция, определяющая один элемент изображения (частицу в потоке); P — функция размещения, задающая положение центров тяжести элементов в изображении; $d\mathbf{r}'$ — элемент объема. Функция f_0 в (1) в общем случае пространственно-неоднородная, т. е. при размещении элементов в плоскости изображения происходит изменение параметров формы элементов, причем функция f_0 может быть как детерминированной, так и случайной.

Соотношение (1) упрощается, если f_0 — пространственно-однородная функция, т. е. $f_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = f_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$. В этом случае функция f представляется в виде свертки функций f_0 и P :

$$f(\mathbf{r}) = \int f_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}') P(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' = (f_0 * P)(\mathbf{r}). \quad (2)$$

Переход от (1) к (2) предполагает, что в пределах анализируемой области изображения поток частиц является пространственно-однородным. При значительной неоднородности потока этого можно добиться, анализируя изображение по частям. При этом должно выполняться неравенство

$$L_n > L \gg l, \quad (3)$$

где L_n — характерный размер неоднородности потока; L — размер анализируемой области изображения; l — среднее расстояние между элементами изображения (частицами потока): $l \sim (S/N)^{1/2}$, S — площадь изображения, N — число элементов.

Скорость частиц при многократной экспозиции кодируется путем изменения функции P . Если выполняется неравенство

$$T_1 \ll l_0/v \ll \Delta T, \quad (4)$$

где T_1 — время одного экспонирования, l_0 — характерный размер части-

$$\begin{aligned} I_1(\rho; \mathbf{v}, \alpha) &= |F_1(\rho; \mathbf{v}, \alpha)|^2 = I_0(\rho; \alpha) I_v(\rho; \mathbf{v}), \\ I_0(\rho; \alpha) &= |F_0(\rho; \alpha)|^2, \quad F_0 = \mathcal{F}\{f_0\}, \\ I_v(\rho; \mathbf{v}) &= |F_v(\rho; \mathbf{v})|^2, \quad F_v = \mathcal{F}\{P_1\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь ρ — радиус-вектор в плоскости пространственных частот; \mathbf{v} — проекция вектора скорости частицы на плоскость изображения; α — вектор параметров, определяющих форму элемента изображения (например, размер, ориентация частицы и т. п.); I_0 и I_v — интенсивности пространственных спектров элемента изображения и функции размещения P_1 элементов в группе многоэкспозиционного изображения; $\mathcal{F}\{ \}$ — преобразование Фурье. Если за время многократной экспозиции вектор скорости \mathbf{v} существенно не изменяется, то

$$I_v(\rho; \mathbf{v}) = [\sin(K(\Delta T/2)\rho\mathbf{v})/\sin((\Delta T/2)\rho\mathbf{v})]^2, \quad (6)$$

где K — число экспозиций. Для двухэкспозиционного изображения соотношение (6) переходит в

$$I_v(\rho; \mathbf{v}) = 2[1 + \cos(\Delta T \rho\mathbf{v})]. \quad (7)$$

Если частицы потока распределены в пространстве статистически независимо, то и группы элементов многоэкспозиционного изображения расположены в плоскости изображения статистически независимо. В этом случае для средней интенсивности пространственного спектра многоэкспозиционного изображения имеем [3]

$$I_N(\rho) = N \langle I_1(\rho; \mathbf{v}, \alpha) \rangle, \quad (8)$$

$$\langle I_1(\rho; \mathbf{v}, \alpha) \rangle = \int I_1(\rho; \mathbf{v}, \alpha) w_2(\mathbf{v}, \alpha) d\mathbf{v} d\alpha, \quad (9)$$

где $\langle \rangle$ — знак операции статистического усреднения; $w_2(\mathbf{v}, \alpha)$ — совместная плотность вероятности вектора скорости и вектора параметров формы элемента изображения; N — число групп элементов, равное числу частиц в анализируемой области потока.

Относительно соотношения (8) сделаем два замечания: 1) если предположение о статистической независимости распределения частиц в пространстве не выполняется, то для получения I_N можно использовать подход, аналогичный изложенному в [3]; 2) при анализе потока по частям случайным является также число групп элементов, в этом случае необходимо дополнительное усреднение по параметру N .

При статистической независимости векторов скорости \mathbf{v} и формы частиц α выражение (8) с учетом (5) можно упростить:

$$I_N(\rho) = N \langle I_\alpha(\rho; \alpha) \rangle \langle I_v(\rho; \mathbf{v}) \rangle, \quad (10)$$

$$\langle I_\alpha \rangle = \langle I_\alpha(\rho; \alpha) \rangle = \int I_\alpha(\rho; \alpha) w_\alpha(\alpha) d\alpha, \quad (11)$$

$$\langle I_v \rangle = \langle I_v(\rho; \mathbf{v}) \rangle = \int I_v(\rho; \mathbf{v}) w(\mathbf{v}) d\mathbf{v}. \quad (12)$$

Функция $\langle I_\alpha \rangle$ определяется усредненной формой частиц, ее анализ возможен методами, изложенными в [3]. Для определения по пространственному спектру скорости потока частиц далее будет рассматриваться только функция $\langle I_v \rangle$.

Для функции $\langle I_v \rangle$ из выражения (12) с учетом (7) получаем

$$\langle I_v \rangle = 2 \left[1 + \int w(\mathbf{v}) \cos(\Delta T \rho \mathbf{v}) d\mathbf{v} \right] = 2 [1 + \operatorname{Re} \Phi(\Delta T \rho)], \quad (13)$$

где $\Phi(\cdot)$ — характеристическая функция распределения w . Как видно из (13), в пространственном спектре двухэкспозиционного изображения весьма просто отражаются статистические характеристики скорости потока частиц.

Примеры определения скорости потока частиц пространственно-спектральным методом. Если распределение модуля вектора скорости и его ориентации статистически независимы, то выражение (13) можно представить в виде

$$\langle I_v \rangle = 2 \left[1 + \int_0^\infty \int_0^{2\pi} w_v(v) w_\varphi(\varphi) \cos(\Delta T \rho v \cos \varphi) dv d\varphi \right], \quad (14)$$

где v — модуль вектора скорости \mathbf{v} , ρ — модуль вектора ρ , φ — угол между векторами \mathbf{v} и ρ , w_v и w_φ — плотности распределения величин v и φ соответственно.

Рассмотрим некоторые частные случаи распределения вектора скорости частиц.

Однонаправленный поток. В этом случае для функции w_φ имеем $w_\varphi(\varphi) = \delta(\varphi - \varphi_0)$. Подставляя это выражение в формулу (14), получаем

$$\langle I_v \rangle = 2 \left[1 + \int_0^\infty w_v(v) \cos(\Delta T \rho v \cos \varphi_0) dv \right]. \quad (15)$$

Если рассматривать изменение средней интенсивности пространственного спектра в направлении, параллельном направлению движения потока ($\varphi_0 = 0$), то (15) можно упростить:

$$\langle I_v \rangle = 2 \left[1 + \int_0^\infty w_v(v) \cos(\Delta T \rho v) dv \right]. \quad (16)$$

1. **Однонаправленный односкоростной поток.** Для односкоростного потока $w_v(v) = \delta(v - v_0)$. В этом случае из (16) получаем $\langle I_v \rangle = 2[1 + \cos(\Delta T v_0 \rho)]$.

На рис. 1, а приведена модель V000 двухэкспозиционного изображения однонаправленного односкоростного потока (направление движения вертикальное). Даже в этом наиболее простом случае визуальное обнаружение пар частиц, а тем самым и определение скорости потока частиц довольно сложно. Это объясняется большой концентрацией частиц, при которой выполняется неравенство $\Delta T v_0 > l$. Для визуального обнаружения пар необходимо выполнение противоположного неравенства $\Delta T v_0 \ll l$. На рис. 1, б показан пространственный спектр изображения V000.

На рис. 2, а даны рассчитанные на ЭВМ зависимости интенсивности в пространственном спектре цифровой модели V000 двухэкспозиционного изображения потока, содержащего 1, 10 и 100 частиц. Флуктуации

интенсивности, связанные со случайным размещением пар, существенно затрудняют анализ пространственного спектра. Выделение эффекта группирования точек в цифровой модели возможно, например, путем реализации алгоритмов сглаживания — рис. 2, б (1, 2 — формы оптического и цифрового сглаживающих окон соответственно). На этом же рисунке приведена микрофотограмма пространственного спектра, показанного на рис. 1, б.

2. Однонаправленный поток с равномерным распределением скорости в интервале $v_0 \pm \Delta v$:

$$w_v(v) = \begin{cases} 1/2\Delta v, & v \in [v_0 - \Delta v, v_0 + \Delta v], \\ 0, & v \notin [v_0 - \Delta v, v_0 + \Delta v]. \end{cases}$$

В этом случае из (16) получаем

$$\langle I_v \rangle = 2[1 + \cos(\Delta T \times \times v_0 \rho) \sin(\Delta T \Delta v \rho) / \Delta T \Delta v \rho].$$

На рис. 3, а, б приведены модель V002 двухэкспозиционного изображения однонаправленного потока частиц с равномерным распределением скорости в интервале $v_0 \pm 0,2v_0$ и ее пространственный спектр. Из сравнения рис. 1, б и 3, б видно, что при наличии разброса скоростей в потоке частиц изменяется контраст периодической структуры в пространственном спектре. Следовательно, для определения закона распределения частиц по скоростям необходимо измерить функцию изменения контраста периодической структуры и вычислить для нее обратное косинус-преобразование Фурье.

Ненаправленный поток частиц (изотропная диффузия). Если вектор скорости равновероятно распределен по всем направлениям, то для функции w_φ имеем

$$w_\varphi(\varphi) = 1/2\pi. \quad (17)$$

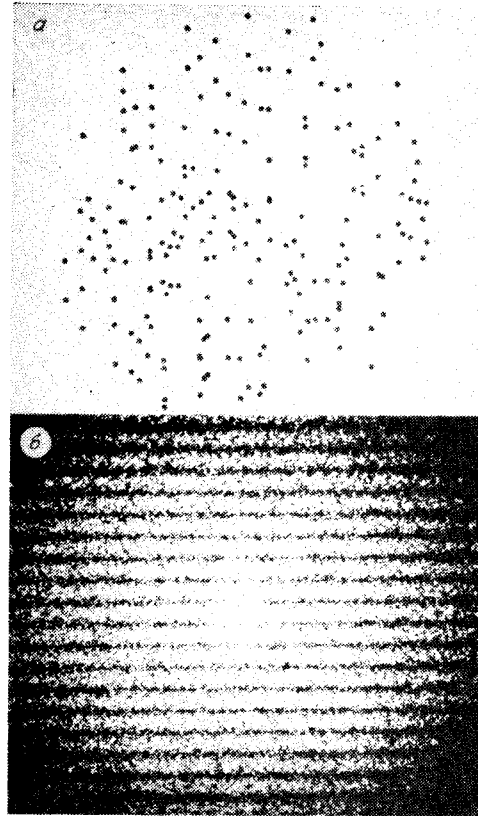


Рис. 1.

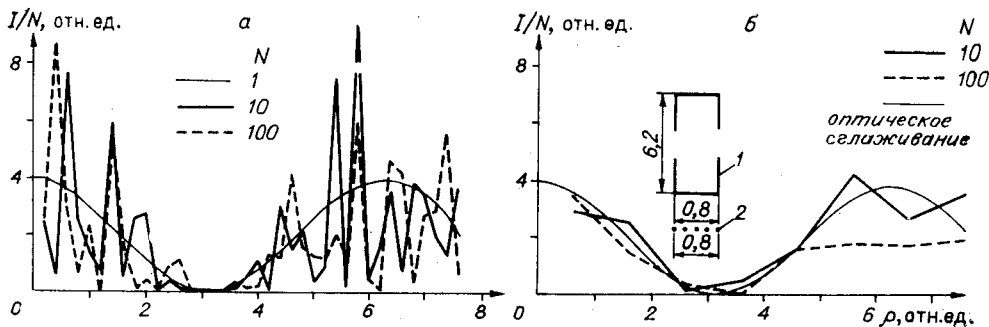


Рис. 2.

Модель	Относительная ошибка, %	
	Средняя скорость	Разброс скорости
V000	1	—
V001	2	4
V002	2	3
G001	6	—

Подставляя это выражение в формулу (14), получаем

$$\langle I_v \rangle = 2 \left[1 + \int_0^{\infty} w_v(v) J_0(\Delta T \rho v) dv \right]. \quad (18)$$

1. Односкоростная изотропная диффузия: $\langle I_v \rangle = 2[1 + J_0(\Delta T \rho v_0)]$, где J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

2. Изотропная диффузия частиц с равномерным распределением скорости в диапазоне $0 - v_0$: $\langle I_v \rangle = 2[1 + 2J_1(\Delta T \rho v_0)/\Delta T \rho v_0]$.

Для некоторых моделей двухэкспозиционных изображений потоков частиц результаты определения скорости частиц пространственно-спектральным методом приведены в таблице, где использованы следующие обозначения: V000 — односкоростной однонаправленный поток; V001 и V002 — однонаправленные потоки с равномерным распределением скорости в интервале $v_0 \pm v_0$ и $v_0 \pm 0,2v_0$ соответственно; G001 — однонаправленный поток с гауссовым распределением средней скорости по сечению.

Авторы выражают благодарность В. А. Решетникову за помощь, оказанную при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турбулентные двухфазные течения/Под ред. М. К. Лаатса.— Таллин: изд. АН ЭССР, 1979, ч. 2.
2. Ертапова О. Н., Лепешинский И. А., Решетников В. А. Голографический анализ дисперсной фазы двухфазного потока.— Теплофизика высоких температур, 1979, т. 17, № 4.
3. Щукин И. В. Когерентно-оптические устройства для автоматической классификации микрообъектов.— В кн.: Проблемы голографии. М.: МИРЭА, 1977, вып. IX, с. 137—145.
4. Бакрунов А. О. и др. Определение поля скоростей двухфазных потоков методами голографии и пространственно-спектрального анализа.— В кн.: Турбулентные двухфазные течения/Под ред. М. К. Лаатса. Таллин: изд. АН ЭССР, 1979, ч. 2.
5. Бакрунов А. О. и др. Голографический метод определения поля скоростей дисперсной фазы двухфазного потока.— Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1980, № 1, с. 182—184.
6. Бакрунов А. О. и др. Определение поля скоростей двухфазных потоков голографическим методом.— В кн.: Вторая всесоюз. школа по оптической обработке информации. Горький: НИРФИ, 1978, с. 91—92.

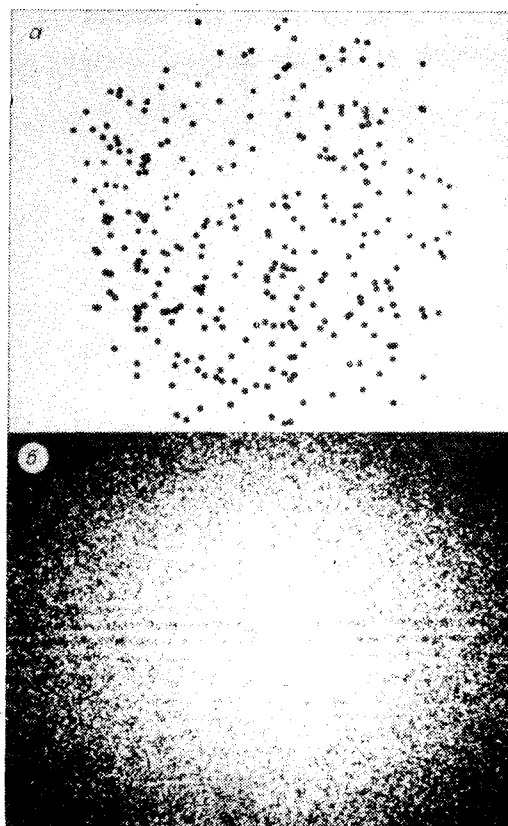


Рис. 3.

7. Щугин П. В. Определение структуры изображений методами когерентной оптики.— В кн.: Статистические свойства микроструктур. [I Всесоюз. конф.]. М.: ОНТИмикробиопром, 1978, с. 94—95.

*Поступила в редакцию 1 августа 1980 г.;
окончательный вариант — 29 июня 1981 г.*

УДК 681.3.06

Введение. Одним из важных методов ускорения разработки систем автоматизации эксперимента на основе аппаратуры КАМАК является использование унифицированных языков программирования, что позволяет не только сократить сроки подготовки программного обеспечения этих систем, но и обеспечить независимость создаваемых программ от типов используемых крейт-контроллеров. В соответствии с этим комитет ESONE разработал и стандартизовал несколько уровней программных средств для управления аппаратурой КАМАК. В статье описывается реализация подмножества одного из таких языков — КАМАК-языка промежуточного уровня IML [1, 2] для автономного крейт-контроллера JCAM-10 [3], построенного на основе микропроцессора INTEL-8080.

Программирование КАМАК-команд для микропроцессора INTEL-8080. Автономный контроллер крейта JCAM-10 конструктивно выполнен в виде модуля КАМАК со встроенным микропроцессором INTEL-8080. Описание контроллера приведено в [3].

Рассмотрим подробнее устройство КАМАК-страницы. КАМАК-страница представляет собой 1 К 24-разрядных слов. Адреса этих слов памяти по отношению к микропроцессору являются виртуальными и служат лишь для запуска КАМАК-цикла по передаче данных между КАМАК-страницей и регистрами модулей. Микропроцессор имеет доступ к каждому из трех байтов 24-разрядного слова КАМАК-страницы.

Адреса регистров модулей в крейте и КАМАК-функции образуют виртуальную КАМАК-память с адресами C000—FFFF.

Автономный контроллер JCAM-10 имеет 8 уровней прерывания: 4 КАМАК-уровня и 4 системных уровня. Прерывания могут быть маскированы с помощью общей маски, индивидуальной маски на каждый уровень прерывания и КАМАК-команд маскирования L-сигналов.

Программирование КАМАК-команд в автономном контроллере JCAM-10 сводится к использованию стандартных инструкций микропроцессора INTEL-8080, ссылающихся на специальную виртуальную память.

Для выполнения КАМАК-команд управления и проверки статуса модулей (без передачи данных) необходимо однократное обращение к виртуальной КАМАК-памяти, адрес которой соответствует необходимому сочетанию F, N, A. Сигналы Q и X, вырабатываемые модулями, помещаются в рабочий регистр (обычно аккумулятор).

КАМАК-команды чтения или записи требуют (кроме обращения к виртуальной КАМАК-памяти) выполнения инструкции, использующей обращение к КАМАК-странице. При этом осуществляется КАМАК-цикл с указанными ранее F, N, A и передачей данных между регистром модуля и КАМАК-страницей в направлении, определяемом значением функции F.

Описание реализации подмножества языка IML. Описываемое ниже подмножество языка IML призвано обеспечить возможность выполнения одиночных действий и относительную независимость программ от кон-