

## ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОЙ ПРИМЕСИ В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ

В. В. Злобин, А. З. Розенштейн

(Таллин)

Рассмотрена возможность применения оптического метода для измерения плотности распределения твердой примеси с узкой функцией распределения частиц по размерам, по интенсивности рассеянного света. Сопоставлением результатов измерений оптическим методом и зондовым показана представительность оптического метода для ряда типов двухфазных течений.

Для получения информации о распределении твердой примеси в двухфазных течениях типа «газ—твердые частицы» обычно применяются отсосные зонды [1]. При проведении измерений в изокINETическом режиме [2, 3] зондовый метод позволяет определить поля расходной массовой концентрации. Обладая рядом достоинств, метод не лишен и существенных недостатков, которые ограничивают область его применения: большое время измерений и связанный с этим большой расход твердой примеси; необходимость определения величины и направления скорости непрерывной фазы, что в пространственных двухфазных течениях представляет сложную задачу; необходимость ориентации приемного отверстия зонда вдоль вектора скорости непрерывной фазы; высокий абразивный износ приемной части зонда, особенно значительный при скоростях течения 100 м/с и выше. Указанные обстоятельства побуждают к поискам более эффективных способов измерения распределения твердой примеси.

Для некоторого класса двухфазных течений весьма перспективным является бесконтактный оптический метод, основанный на зависимости интенсивности рассеянного света от свойств рассеивающей среды. В общем случае эта зависимость имеет весьма сложный характер, но в случае сохранения функции распределения частиц по размерам на основании известных соотношений [4] для двух достаточно малых областей потока с координатами  $x_i, y_i$  и  $x_k, y_k$  можно записать

$$(1) \quad \frac{\rho_{sd}(x_i, y_i)}{\rho_{sd}(x_k, y_k)} = \frac{I(\beta, x_i, y_i) I_0(x_k, y_k)}{I(\beta, x_k, y_k) I_0(x_i, y_i)},$$

где  $I_0(x, y)$  — интенсивность падающего луча в объеме  $v$  с координатами  $x, y$ ;  $I(\beta, x, y)$  — интенсивность света, рассеянного в объеме  $v$  под углом  $\beta$  к направлению падающего луча;  $\rho_{sd}$  — дисперсионная плотность или плотность распределения дискретной примеси, т. е. масса частиц в единице объема.

Предполагая, что для исследуемой среды применим закон Бугера (как следует из работы [5], закон Бугера действителен в определенных случаях до оптических плотностей порядка  $\tau=12$ ), выражение (1) можно

переписать с учетом ослабления падающего и рассеянного пучков в следующем виде:

$$(2) \quad \frac{\rho_{sd}(x_i, y_i)}{\rho_{sd}(x_k, y_k)} = \frac{\tilde{I}(\beta, x_i, y_i) \exp \left[ \int_0^{l_i} K(x, y) dl + \int_0^{l_i^1} K(x, y) dl \right]}{\tilde{I}(\beta, x_k, y_k) \exp \left[ \int_0^{l_k} K(x, y) dl + \int_0^{l_k^1} K(x, y) dl \right]}$$

где  $K$  определяется выражением

$$(3) \quad K(x, y) = N_0(x, y) \int K(\rho, m) \pi r^2 f_N(r) dr.$$

Здесь  $\rho = 2\pi r/\lambda$  — дифракционный параметр;  $K(\rho, m)$  — коэффициент ослабления частицы;  $\tilde{I}$  — интенсивность света вне объема рассеивающей среды. Следует отметить, что в зависимости от условия регистрации  $K(\rho, m)$  может меняться от 1 до 2 [6]. Введем обозначения

$$\int K(x, y) dy = \tau_1(x) = \ln \frac{\tilde{I}_0^+}{\tilde{I}_1^+},$$

$$\int K(x, y) dx = \tau_2(y) = \ln \frac{\tilde{I}_0^-}{\tilde{I}_1^-},$$

где интегрирование производится вдоль соответствующего луча, а смысл обозначений  $\tilde{I}_0^-$ ,  $\tilde{I}_0^+$ ,  $\tilde{I}_1^-$ ,  $\tilde{I}_1^+$  виден из фиг. 1.

Величина экспоненциальных показателей, характеризующих суммарное ослабление, может быть весьма просто определена при выборе подходящей системы измерения для объектов с осевой симметрией и симметрией относительно оси. В первом случае для углов рассеяния  $\beta = 90^\circ$  и сканировании оптической системы в плоскости  $xy$  вдоль оси  $y$ , проходящей через центр рассеивающей среды, на основании (2) можно показать, что

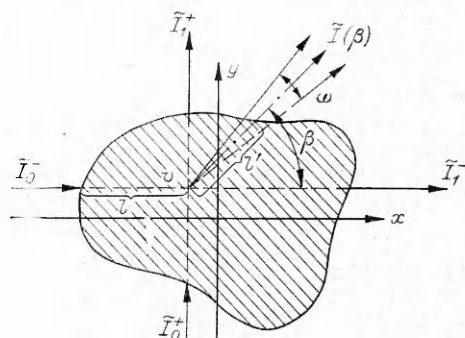
$$\frac{\rho_{sd}(0, y)}{\rho_{sd}(0, 0)} = \frac{V \tilde{I}(\beta, 0, +y) \tilde{I}(\beta, 0, -y)}{\tilde{I}(\beta, 0, 0)} \exp \left| \frac{\tau_2(y) - \tau_2(0)}{2} \right|.$$

Для аналогичной схемы измерений, но с малым углом рассеяния относительно направления падающего луча формула (2) преобразуется к виду

$$\frac{\rho_{sd}(x, y)}{\rho_{sd}(0, 0)} = \frac{\tilde{I}(\beta, x, y)}{\tilde{I}(\beta, 0, 0)} \exp [\tau_2(y) - \tau_2(0)].$$

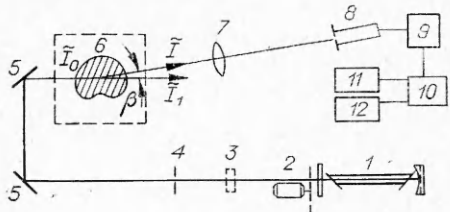
Ослабление падающей и рассеянной волн в общем случае может быть найдено на основании соотношения (3) методом последовательных приближений, при этом в качестве начального приближения можно принять

$$K^{(0)}(x, y) = \frac{\tau_1}{\int \frac{\tilde{I}(\beta, x, y)}{\tilde{I}(\beta, 0, 0)}} \cdot \frac{\tilde{I}(\beta, x, y)}{\tilde{I}(\beta, 0, 0)}$$



Ф и г. 1

Как отмечалось выше, достаточным условием выполнения соотношения (1) является сохранение функции распределения частиц по размерам. В действительности большинство процессов в двухфазной аэродинамике протекает таким образом, что происходит определенная деформация функции распределения частиц по размерам, поэтому рассмотренным методом можно получить представительную информацию о поле дисперсионной плотности только в потоках с достаточно узкой функцией распределения частиц по размерам. Даже при соблюдении этого условия для каждого класса течений требуется специальная проверка возможности его применения, что можно осуществить путем сравнения с результатами, полученными независимым методом. Необходимо отметить, что подобное сопоставление является не проверкой данного метода, который является точным, а проверкой выполнения предположений, положенных в основу метода, в реальных двухфазных потоках. Сопоставление производилось с изокинетическим зондовым методом для течения в круглой трубе, двух-



Ф и г. 2

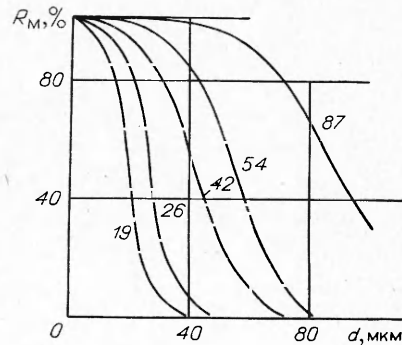
фазной затопленной струе и в поперечной двухфазной струе при дозвуковых режимах течения. Максимальная погрешность зондового метода, определяемая сопоставлением расхода, подсчитанного по профилям потока массы с общим расходом примеси, составляет 10%. Что касается аппаратной погрешности, то она определяется линейностью схемы и составляла ~3%.

Для измерения распределения дисперсионной плотности в поперечной двухфазной струе использована установка (фиг. 2), основными элементами которой являются: лазер ЛГ-75, работающий в многомодовом режиме (1); круглый диск с 32 отверстиями, модулирующий световой луч с частотой 1600 Гц (2); поляризационный светофильтр для изменения интенсивности светового луча (3); круглая диафрагма с диаметром отверстия 1 мм (4); поворотные зеркала (5); исследуемый объем дисперсной среды (6); длиннофокусная линза  $F=220$  мм (7); фотоумножитель и плоская диафрагма (8). Штриховой линией показан канал, выполненный из оргстекла.

Работа установки осуществляется следующим образом. Модулированный световой луч проходит через исследуемый объем. Часть света, рассеянного в зондируемом объеме, падает на линзу (7) и проецируется на диафрагму (8). Сигнал с ФЭУ через катодный повторитель (9) подается на узкополосный усилитель В6-4 (10). Для непрерывной записи амплитуды сигнала использовался самопишущий потенциометр КСП-4 (11). Отсутствие нелинейных искажений контролировалось при помощи осциллографа С1-5 (12). Измерение отношения  $\bar{I}_0/\bar{I}_1$  производилось этой же схемой. Размер зондируемого объема  $v$  вдоль оси  $x$  составлял 5 мм.

Аналогичная схема измерений применялась при исследовании двухфазной затопленной струи.

Скорость твердой примеси  $V_s$  измерялась системой ЛДИС, представлявшей собой модифицированный ва-

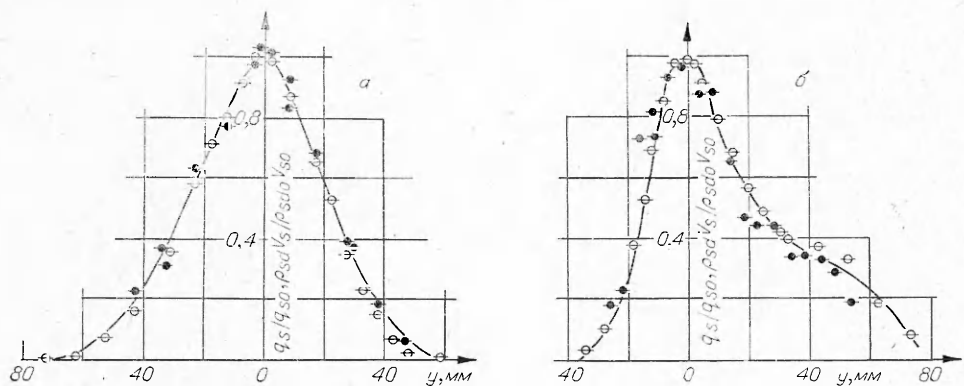


Ф и г. 3

риант [7]. Погрешность измерения, определяемая сопоставлением измерения скорости частичек дыма системой ЛДИС и скорости газа трубкой Прандтля, составляет 4%.

В качестве дискретной примеси использовались порошки электрокорунда со средневесовым размером 19, 26, 42, 54 и 87 мкм, гистограмма которых приведена на фиг. 3.

Профили относительного потока массы примеси  $q_s = \rho_{sd} V_s$  в плоскости симметрии поперечной двухфазной струи полученные зондовым (темные точки) и оптическим (светлые точки) методами, представлены на фиг. 4

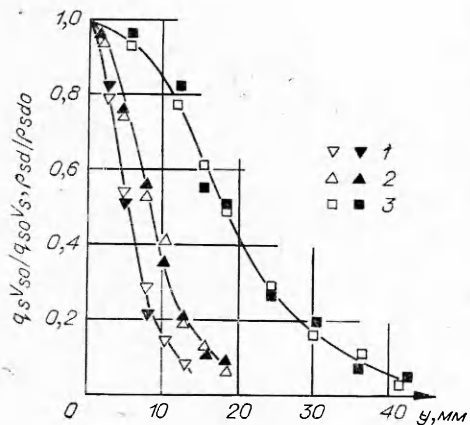


Фиг. 4

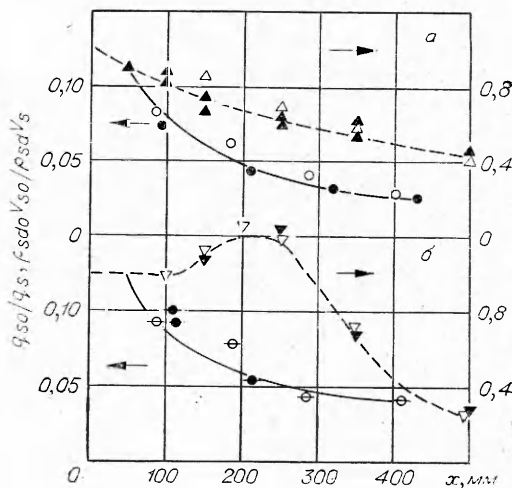
при крупности примеси 54 мкм (а) и 19 мкм (б) и расходной массовой концентрации  $\kappa=1,0$  и  $0,6$  соответственно. Сравнение приведено для сечения вблизи разворота струи, в котором наблюдается максимальная деформация начальной функции распределения частиц по размерам.

Профили относительной дисперсионной плотности в сечении двухфазной струи, измеренные на расстоянии 250 мм от среза трубы диаметром 30 мм, представлены на фиг. 5 при крупности примеси 26 (1), 42 (2) и 87 мкм (3).

С точки зрения представительности оптического метода наибольший интерес, на наш взгляд, представляют данные фиг. 6, где сопоставлены



Фиг. 5



Фиг. 6

кривые затухания относительного потока массы, причем соответствующие величины отнесены к среднему по сечению значению в устье струи. Обозначения соответствуют фиг. 4, 5.

Данные фиг. 4—6 показывают в пределах указанной погрешности измерений представительность оптического метода измерения распределения твердой примеси для порошков с узкой функцией распределения частиц по размерам для рассмотренных классов двухфазных течений.

Поступила 19 VI 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гендриксон В., Злобин В., Лаатс М., Фришман Ф., Эпштейн А. Процессы переноса в турбулентных течениях со сдвигом. Таллин, Изд-во АН ЭССР, 1973.
2. Soo S. L., Stukel I. I., Hughes I. M. Measurements of Mass Flow and Density of Aerosols in Transport. Environ. Sci. and Technol., 1969, vol. 3, № 4.
3. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.
4. Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М., ИЛ, 1961.
5. Кабанов М. В., Савельев Б. А., Фадеев В. Я. Зависимость границ применимости закона Бугера в рассеивающих средах от оптического диаметра светового пучка. Изв. ВУЗов. Физ., 1967, т. 7.
6. Чекалин Э. К. Оптический метод определения размеров частиц в полидисперсной среде.— В кн.: Физич. газодинамика и хим. реак. газов. М., «Наука», 1968.
7. Розенштейн А. З., Самуэль К. Р. Применение лазерного доплеровского измерителя скорости для исследования двухфазных течений типа «газ — твердые частицы». Изв. АН СССР, физ.-мат., 1974, т. 23, № 1.