

<https://doi.org/10.3176/phys.math.1976.3.10>

УДК 532.529

В. ЗЛОБИН, М. МООС

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТНОЙ ФАЗЫ В СИСТЕМЕ «ДВУХФАЗНАЯ СТРУЯ — ПОПЕРЕЧНЫЙ ПОТОК»

Оптический метод измерения распределения дискретной фазы или лазерный измеритель концентрации (ЛИК), предложенный в [1], зарекомендовал себя надежным и продуктивным методом для двухфазных потоков типа «газ — твердые частицы» с фиксированной или мало деформирующейся функцией распределения частиц по размерам, а именно: трубных течений, двухфазной струи [1], течений в соплах [2]. Расширение области применения ЛИК к потокам с деформирующейся функцией распределения частиц по размерам или, иначе говоря, к потокам, в которых средний размер частиц зависит от пространственной координаты, требует уточнения в системе расшифровки данных, получаемых методом ЛИК. В настоящей работе рассматриваются особенности применения ЛИК в системе «двухфазная струя — поперечный поток», т. е. к типу течения с деформирующейся функцией распределения частиц по размерам.

Оптический метод измерения распределения дискретной фазы основан на измерении интенсивности рассеянного под некоторым углом света и величины затухания опорного и рассеянного луча в оптически неоднородной среде. Интенсивность рассеянного под углом  $\beta$  света  $I(\beta)$  связана с интенсивностью падающего луча  $I_0$  и оптическими свойствами среды соотношением

$$I(\beta) = I_0 e^{-k} \iint \sigma(r_p) N(r_p) F(\varrho, \beta, m) d\varrho dv, \quad (1)$$

где  $F(\varrho, \beta, m)$  — функция, характеризующая рассеивающую способность частиц,  $\sigma(r_p)$  — миделево сечение частицы,  $N(r_p)$  — числовая функция распределения частиц по размерам,  $\varrho = 2\pi r_p/\lambda$  — дифракционный параметр,  $v$  — объем зондирования,  $e^{-k}$  — экспоненциальный член, учитывающий ослабление падающего и рассеянного луча. В дальнейшем рассматривается схема с малым углом рассеяния, в этом случае учет ослабления упрощается и соотношение (1) принимает вид

$$\frac{I(\beta)}{I_1} = \iint \sigma(r_p) N(r_p) F(\varrho, \beta, m) d\varrho dv, \quad (2)$$

где  $I_1$  — интенсивность падающего луча после прохождения объема рассеивающей среды. Если средний размер частиц в исследуемом объеме постоянен, то из (2) следует

$$\bar{\varrho}_s = \bar{N}_s = \overline{I(\beta)/I_1}, \quad (3)$$

где черта означает, что соответствующая величина отнесена к ее значению в характерной точке, а  $q_s$  — плотность распределения дискретной фазы. В общем случае (2) может быть записано в виде ( $d_p$  — средний размер частиц в зондируемом объеме)

$$\bar{q}_s = \frac{\overline{I(\beta)}}{I_1} \frac{\bar{d}_p}{\bar{f}(q)}. \quad (4)$$

Раскрытие зависимости  $\bar{f}(q)$  при условии  $m, \beta = \text{const}$ , возможное только экспериментально, выполнено на установке, описанной ниже. Измерялись распределение величины  $I(\beta)/I_1$  и скорости дискретной фазы на выходе из трубы для монофракций со средним размером частиц 12, 16, 24, 32, 70 и 88 мкм. Полученные данные осреднялись по выходному сечению (обозначено знаком «тильда»), так что

$$f(q) = \bar{f}(\tilde{q}) = \frac{d_p}{G_s} \frac{I(\beta) U_s}{I_1}.$$

Графическая интерпретация экспериментальных данных (рис. 1) показывает, что в области  $q > 150$  величина  $I(\beta)/I_1 \sim Nd_p^2$ , а при меньших  $q$  соответственно  $I(\beta)/I_1 \sim Nd_p$ .

Соотношение (4) устанавливает связь между непосредственно измеряемыми методом ЛИК величинами и плотностью распределения дискретной фазы с точностью до функции, зависящей от размера частиц. Размер частиц, а точнее характер изменения среднего размера частиц, должен быть определен на основе специальных измерений или, в некоторых случаях, соответствующей постановкой эксперимента.

Экспериментальная установка (рис. 2) представляет собой аэродинамическую трубу отсосного типа с рабочей частью размером  $350 \times 300$  мм (4), в которой предусмотрены нижние окна для ввода зондов и боковые — для установки оптических стекол при измерении оптическими методами. Равномерность потока достигается с помощью конфузора (1), ханекомба (2), сетки (3) и диффузора (5). На выходе аэродинамической трубы установлены циклоны общей производительностью  $6000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и отсосный вентилятор ВВД-8. Струевая магистраль имеет в своем составе: нагнетающее устройство (вентилятор или компрессор), блок ротаметров (6), шнековые дозаторы (7), разгонную магистраль (8). Кроме того, установка снабжена рядом измерительных и контролирующих режим работы приборов.

На рис. 2 изображена также схема измерения потока массы дискретной фазы, включающая трехканальный зонд (11) с диаметром приемного отверстия 2 мм, баночки для сбора порошка (9), имеющие трехслойный фильтр (палаточный брезент, шерстяное сукно, саржа) и блок ротаметров (10). Измерения проводились в режиме изокINETического

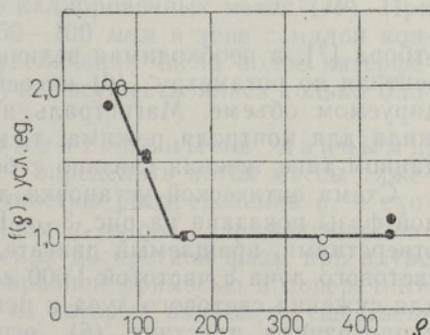


Рис. 1. Зависимость изменения  $f(q)$  от дифракционного параметра,  $\beta = 14^\circ$ .

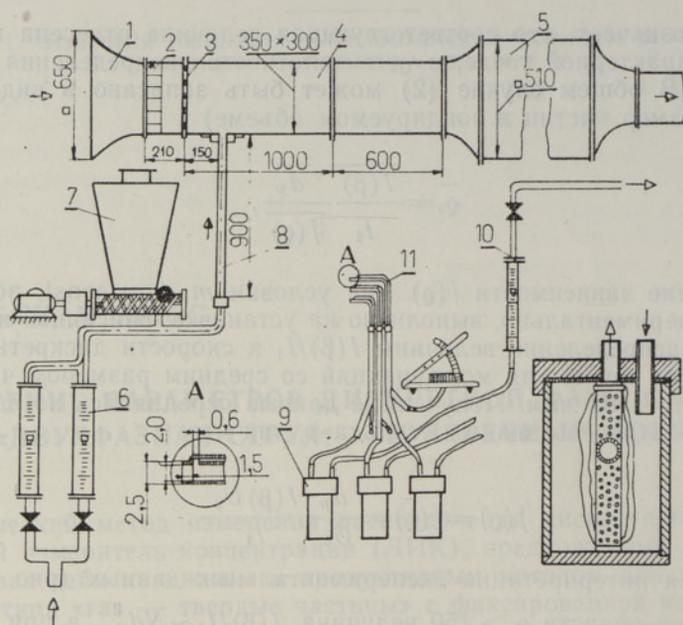


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

отбора [3], а необходимая величина отсоса регулировалась с помощью вентиля по ротаметру (10) на основе известной скорости потока в зондируемом объеме. Магистраль измерения статического давления служила для контроля режима, т. к. измерение статического давления в данном типе течения связано с большими трудностями.

Схема оптической установки для измерения распределения дискретной фазы показана на рис. 3, а. В нее входят: лазер ЛГ-75 (1), диск с отверстиями, вращаемый двигателем синхронного типа для модуляции светового луча с частотой 1600 гц (2), поворотные зеркала (3), линзы для сужения светового луча и повышения его интенсивности (4, 5), полупрозрачная пластина (6), ограничивающая диафрагма диаметром 1 мм (7), собирающая линза (8), фотоумножители ФЭУ-68 (9—11). Рассеянный в телесном угле  $\omega$  свет собирается линзой (8) и фокусируется на диафрагму ( $0,4 \times 2,5$  мм) ФЭУ (9). Напряжение, снимаемое с нагрузки ФЭУ, проходит через узкополосный усилитель (12), имеющий шесть декад с общим коэффициентом деления 1 : 64, и записывается на потенциометре КСП-4 (13). Схемы каналов опорного  $I_0$  и ослабленного  $I_1$  лучей аналогичны. При переходе к новому сечению измерения происходит определенное изменение угла падения луча на оптические стекла (7), что заметно смещает световое пятно на диафрагме ФЭУ (10). Указанное обстоятельство вызывает необходимость в подстройке оптической схемы; наличие канала  $I_0$  облегчает ее.

Экспериментальная установка для измерения компонент скорости дискретной фазы является модификацией ЛДИС [4]. Схема установки показана на рис. 3, б. Она состоит из следующих элементов: лазера ЛГ-38 (1), поворотных зеркал (2), блока для расщепления исходного луча на два пучка примерно равной интенсивности и поворота плоскости их падения на  $90^\circ$  (3), фокусирующей линзы (4)  $F = 600$  мм, ограничивающей диафрагмы (5), собирающей линзы (6), фотоумножителя ФЭУ-51 (7), широкополосного усилителя (8), спектроанализатора С4-25 (9) и

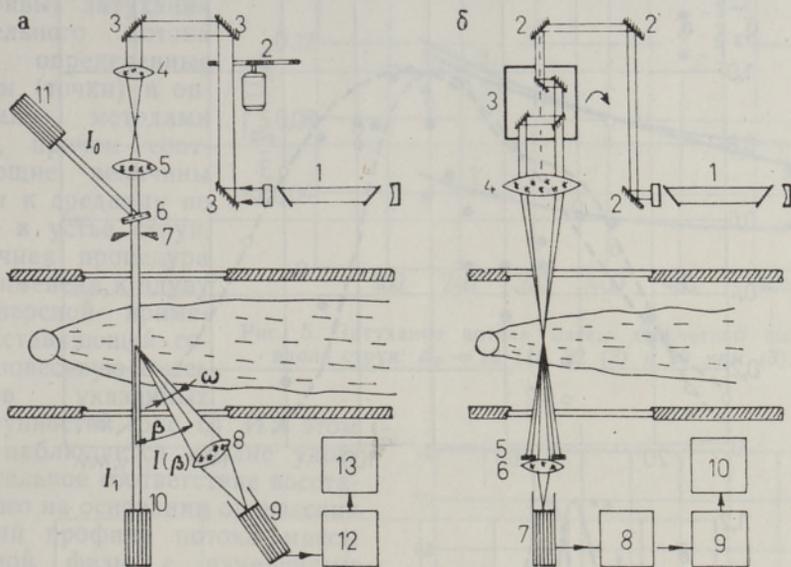


Рис. 3. Схема оптической установки для измерения распределения (а) и скорости (б) дискретной фазы.

генератора Г4-102 для подачи на С4-25 калибровочных меток (10). При измерении скорости частиц размером 50—100 мкм в зоне с малой концентрацией линза (4) снималась для увеличения числа полос интерференционной решетки, а фокусировка лучей осуществлялась только блоком (3).

Сопоставление с экспериментальными данными. Измерение зондовым методом позволяет определить поток массы тяжелой примеси  $q_s$ , который связан с плотностью распределения  $q_s$  и скоростью  $U_s$  дискретной фазы соотношением  $q_s = q_s U_s$ . Применение зондового метода для изучения распределения дискретной фазы при вдуве двухфазной струи с тяжелой порошкообразной примесью в поперечный поток ограничивает ряд обстоятельств, из которых наиболее существенными являются следующие: необходимость определения величины и направления скорости непрерывной фазы; невозможность ориентации приемного отверстия зонда; большая погрешность измерений при малых концентрациях дискретной фазы и малой ее крупности. С другой стороны, оптические методы позволяют определять величины  $q_s$  и  $U_s$  с точностью до функции, зависящей от размера частиц. В какой мере это обстоятельство может затруднить интерпретацию результатов измерений оптическими методами можно видеть из рис. 4, где сопоставлены относительные профили потока массы тяжелой примеси, полученные зондовым (точки) и оптическими методами (линии) при вдуве монофракционных порошков со среднемассовым размером 16, 32 и 70 мкм; средняя скорость потока 9,5 м/сек; диаметр струи 15,8 мм, среднерасходная скорость 23,8 и 10,0 м/сек (при крупности 70 мкм), начальная расходная массовая концентрация 0,3 кг/кг. Штриховыми кривыми на рис. 4 показаны профили  $\overline{I(\beta)U_s/I_1}$ , а сплошными  $\overline{q_s U_s} = \overline{I(\beta)U_s d_p / [I_1 f(q)]}$ . Распределение частиц поперек потока определялось на основе профилей  $\overline{I(\beta)U_s/I_1}$  из условия, что частицы со среднемассовыми размерами примеси находятся в зоне максимума указанных профилей.

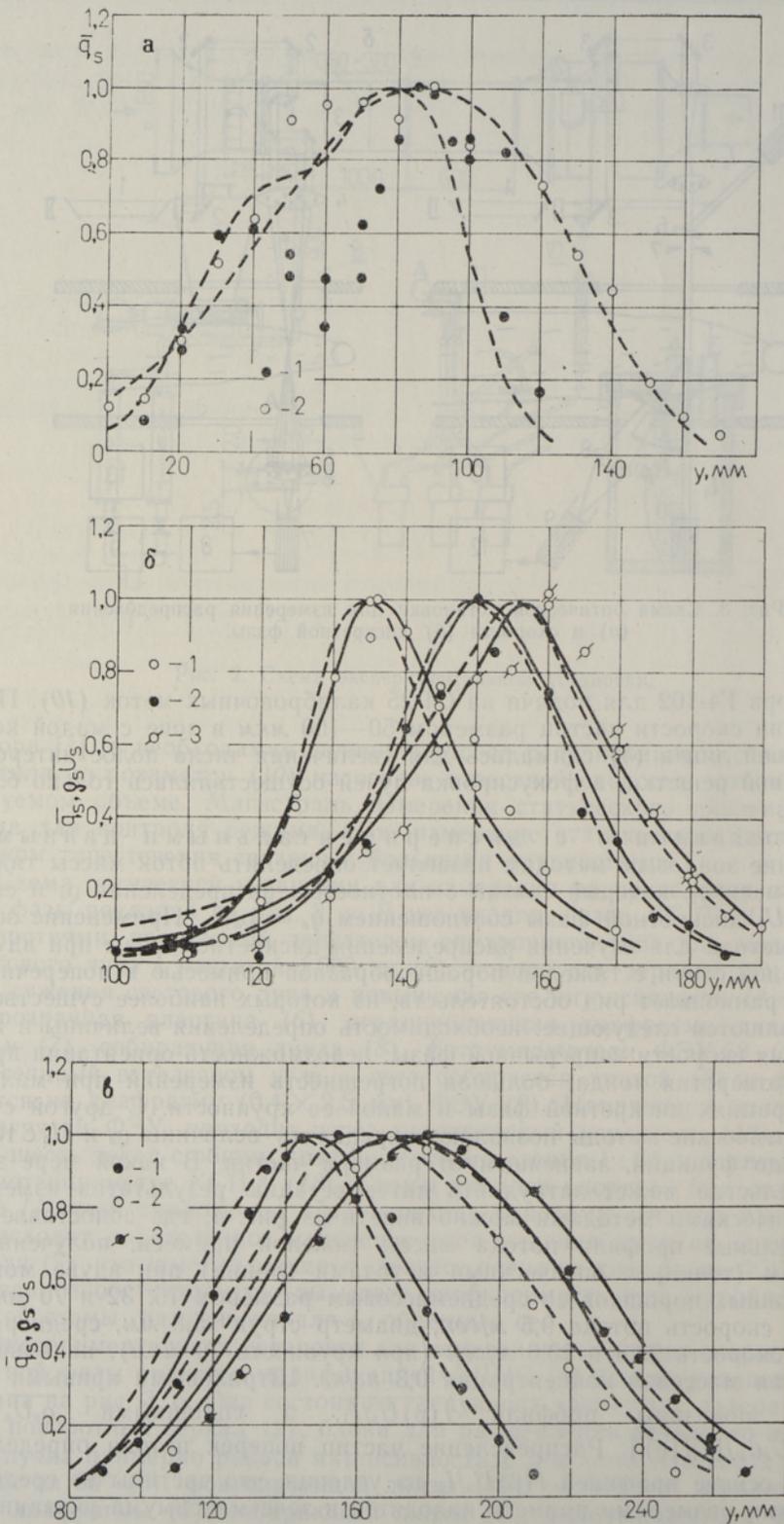


Рис. 4. Профили потока массы дискретной фазы в поперечных сечениях струи при крупности примеси 16 (а), 32 (б) и 70 мкм (в).  
 1 —  $x = 200$  мм, 2 —  $x = 400$  мм, 3 —  $x = 600$  мм.

На рис. 5 сопоставлены кривые затухания относительного потока массы, определенные зондовым (точки) и оптическими методами (линии), причем соответствующие величины отнесены к среднему по сечению в устье струи. Аналогичная процедура была применена к вдуву полидисперсной смеси, представляющей собой равновесную смесь порошков указанных выше крупностей (рис. 6). И в этом случае наблюдается вполне удовлетворительное соответствие восстановленного на основании оптических измерений профиля потока массы дискретной фазы с измеренным зондовым методом.

Оптический метод измерения распределения дискретной фазы совместно с лазерным доплеровским измерителем скорости позволяет получать достоверную информацию об осредненных параметрах дискретной фазы при вдуве струи с тяжелой порошкообразной примесью узкофракционного состава в поперечный поток. Этот вывод не относится к зоне с малой концентрацией дискретной фазы, где размеры частиц значительно отличаются от среднего размера частиц примеси, а также к полидисперсной примеси. В этих случаях необходим пересчет данных с учетом действительного размера частиц в соответствии с уравнением (4) и дополнительное рассмотрение схемы методом определения среднего размера частиц.

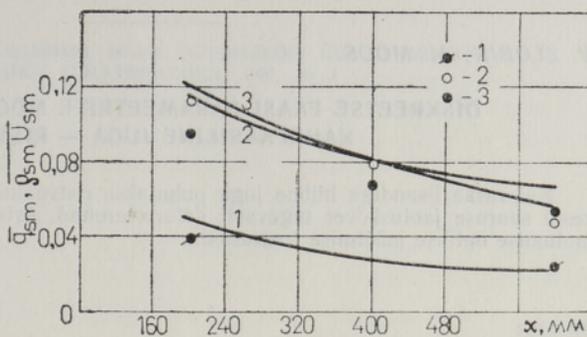


Рис. 5. Затухание потока массы дискретной фазы вдоль струи:  $d_p = 16$  (1), 32 (2) и 70 мкм (3).

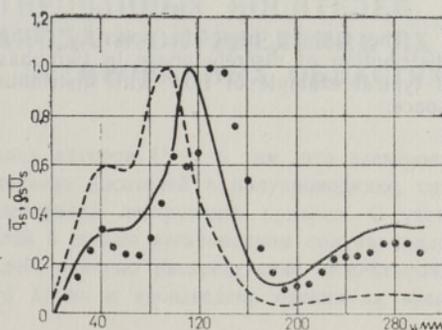


Рис. 6. Профили потока массы дискретной фазы в поперечном сечении  $x = 200$  мм при вдуве струи с полидисперсной примесью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Злобин В. В., Розенштейн А. З., ПМТФ, № 1, 142 (1975).
2. Злобин В. В., Изв. АН СССР, МЖГ, № 4, 46 (1975).
3. Гендриксон В., Злобин В., Лаатс М., Фришман Ф., Эпштейн А., Процессы переноса в турбулентных течениях со сдвигом, Таллин, 1973.
4. Розенштейн А., Самуэль К., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 23, 58 (1974).

Институт термофизики и электрофизики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
12/IX 1975

V. ZLOBIN, M. MOOS

### DISKREETSE FAASI PARAMEETRITE MÕÖTMINE SÜSTEEMIS КАНЕФААСИЛИНЕ ЈУГА — РИСТВООЛУС

Kui raske lisandiga hiibne juga puhutakse ristvoolusesse, on tekkinud vooluses osakeste suuruse jaotuskõver tugevasti deformeerunud. Artiklis käsitletakse diskreetse faasi jaotumise optilise mõõtmise iseärasusi.

V. ZLOBIN, M. MOOS

### MEASUREMENT OF PARAMETERS OF THE DISCRETE PHASE IN THE SYSTEM "TWO-PHASE JET — CROSS WIND"

The authors treat the specificity of using the optical method of measurements of distribution of discrete phase in two-phase jet developing in the cross wind, which is a typical example of flow with distribution function of particles strongly deformed in space.

