

А. РОЗЕНШТЕЙН, К. САМУЭЛЬ

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТИПА «ГАЗ — ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ»

Для решения задач механики двухфазных потоков необходима информация об относительном движении фаз. Следует отметить, что классические зондовые методы исследования двухфазных потоков не позволяют получать кинематические характеристики твердой или жидкой фазы.

Наиболее перспективными для решения данной задачи являются бесконтактные методы, основанные на принципах оптической доплеровской локации [1]. В основе работы оптических доплеровских измерителей скорости (ОДИС) лежит двукратный эффект Доплера. Оптическая неоднородность в потоке жидкости или газа играет роль транслятора, упруго рассеивая падающее на нее излучение лазера. Доплеровский сдвиг частоты, пропорциональный скорости движения неоднородности, выделяется методами оптического гетеродинирования или спектральными приборами с высокой разрешающей способностью. Вопросы применения и краткий анализ работы ОДИС освещены в обзорах [1, 2]. Необходимо отметить, что большинство работ этой области относится к исследованию однофазных потоков, в которых функцию рассеивающих центров выполняют мелкие, размером порядка одного микрона частицы, полностью увлекаемые движущейся средой. Значительно менее исследованы двухфазные потоки типа «газ — жидкость» и практически отсутствуют работы по исследованию течений типа «газ — твердые частицы». Специфика исследования течений типа «газ — твердые частицы» с помощью лазерных доплеровских анемометров определяется наличием твердой фазы, представляющей собой ансамбль полидисперсных частиц произвольной формы, размер которых значительно превышает длину волны излучения лазера. Высокая концентрация частиц твердой фазы обуславливает большую оптическую плотность исследуемых потоков и сильную деполяризацию рассеянного излучения. Эти факторы приводят к возмущению пространственной когерентности распространяющегося луча лазера и, как следствие, затрудняют применение ОДИС, когда доплеровская частота выделяется методом оптического гетеродинирования. Дополнительная сложность возникает из-за отсутствия строгой теории рассеяния на частицах произвольной формы: получить аналитические выражения для параметров доплеровского сигнала практически невозможно.

В данной работе сделана попытка применить ОДИС для исследования движения частиц твердой фазы в двухфазной струе типа «газ —



твердые частицы». Исследуемая среда представляла собой смесь воздуха с порошками корунда ( $Al_2O_3$ ). Порошки корунда использовались в виде достаточно узких фракций с характерным максимумом распределения частиц по размерам. Размеры частиц варьировались в интервале от 5 до 200 мк. Типичный вид частиц показан на рис. 1.

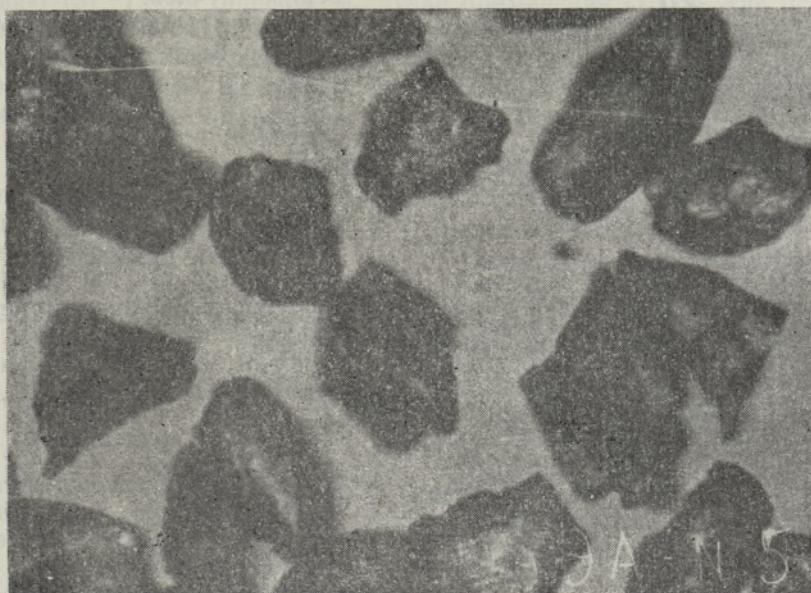


Рис. 1. Вид частиц  $Al_2O_3$ . Увеличение 80 X.

Для измерения скорости частиц была применена дифференциальная схема ОДИС, предложенная в работе [3].

Отличительными чертами этой схемы являются независимость ширины спектра сигнала от апертуры собирающей рассеянный свет линзы и независимость частоты доплеровского сигнала от направления наблюдения, что делает ее удобной для исследования движения частиц с асимметричной индикатриссой рассеяния. Анализ работы дифференциальной схемы ОДИС возможен на основе двух подходов: собственно эффекта Доплера [1-3] и интерференционной модели, предложенной в работе [4]. Сопоставление обоих подходов проводится в работе [5]. В дифференциальной схеме в исследуемую точку направляются два когерентных пучка света с волновыми векторами  $K_1$  и  $K_2$  соответственно. Первый подход предполагает интерференцию на фотоприемнике рассеянных движущейся неоднородностью волн, имеющих различные доплеровские смещения частоты. В этом случае фототок приемника содержит переменную составляющую, частота которой равна разности доплеровских частот, падающих на фотоприемник волн. Как было показано в [3], разность доплеровских частот в такой схеме не зависит от направления наблюдения, а определяется только проекцией вектора скорости  $U$  на разностный вектор падающих пучков, т. е.

$$\Delta f_D = \frac{1}{2\pi} (K_1 - K_2) U. \quad (1)$$

Для выбранной геометрии эксперимента (рис. 2)



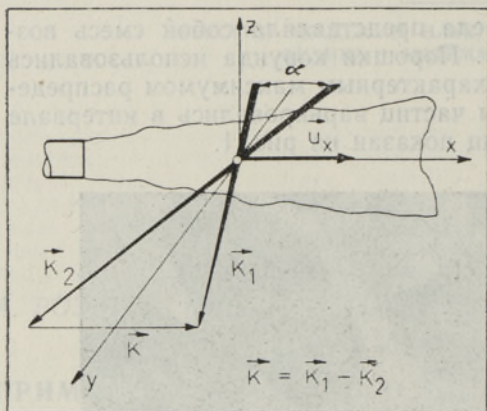


Рис. 2. Геометрия эксперимента.

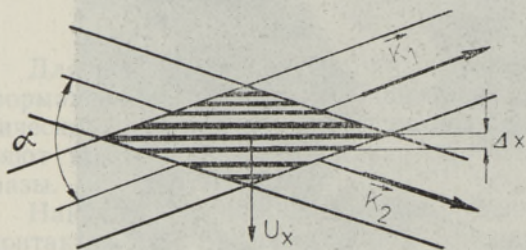


Рис. 3.

$$\Delta f_D = \frac{2U_x}{\lambda} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (2)$$

где  $U_x$  — скорость потока,  $\lambda$  — длина волны излучения лазера,  $\alpha$  — угол пересечения лазерных пучков.

Угол  $\alpha$  выбирался из следующего соображения: как отмечалось выше, анализ работы схемы возможен и на основе интерференционной модели, согласно которой в области пересечения когерентных лазерных пучков имеет место синусоидальное распределение интенсивности света с гауссовой огибающей в плоскости, перпендикулярной оптической оси (рис. 3). Период такой интерференционной картины  $\Delta x = \lambda/2 \sin \frac{\alpha}{2}$ . Оптическая неод-

нородность, пересекающая интерференционное поле, рассеивает свет, причем последний модулируется с частотой, определяемой периодом интерференционной картины  $\Delta x$  и скоростью

движения неоднородности  $U$ . Выражение для частоты модуляции идентично выражению (1), полученному из рассмотрения эффекта Доплера. Для получения эффективной глубины модуляции необходимо, чтобы размер неоднородности  $D$  удовлетворял условию

$$D \leq \Delta x/2. \quad (3)$$

Таким образом, если размер неоднородности задан, угол пересечения пучков  $\alpha$  находится из выражения (3). При этом эффективный объем наблюдения определяется областью пересечения лазерных пучков, размеры которой на уровне уменьшения интенсивности  $\exp(-2)$  по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно равны:

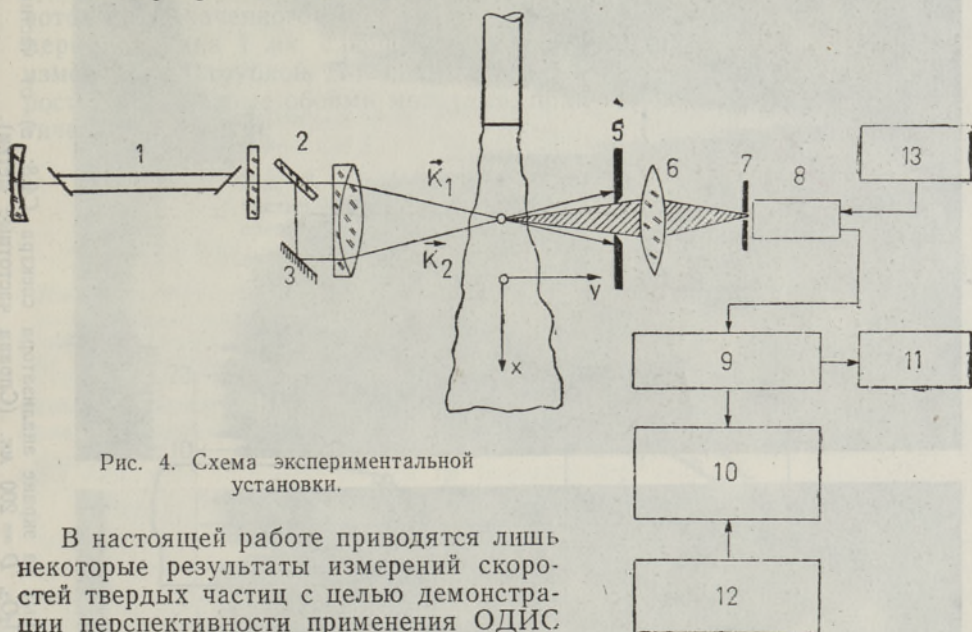
$$2\omega_0 \cos^{-1} \alpha/2, \quad 2\omega_0 \sin^{-1} \alpha/2, \quad 2\omega_0, \quad (4)$$

где  $\omega_0$  — радиус лазерного пучка в месте пересечения.

Из выражений (3) и (4) видно, что в случае больших частиц (порядка 200 мк) выполнение условия (3) приводит к необходимости использовать широкие пучки, пересекающиеся под углом 0,003 рад, что в свою очередь приводит к резкому уменьшению разрешения системы, определяемого размерами области пересечения (4) и глубиной резкости приемной оптики. В наших опытах обнаружено, что в случае выпуклых несферических частиц с хаотической ориентацией выполнение условия (3) оказывается необязательным. Наблюдение устойчивого сигнала с отношением сигнал/шум порядка 8 дБ было возможным для всех (5—200 мк) размеров частиц при периоде интерференционной картины 10 мк, что заведомо не удовлетворяет неравенству (3). Период 10 мк



был выбран из соображений удобства при пересчете данных. В первом приближении можно предположить, что в случае прохождения через интерференционную картину частиц, относящихся к типу, показанному на рис. 1, определяющим фактором является наличие острых граней, углов, сколов на поверхности частиц, размер которых удовлетворяет условию (3). Таким образом, в случае применения ОДИС для исследования движения подобных частиц оказывается возможным удовлетворение двух противоречивых требований: соответствия периода интерференционной картины размерам неоднородности и хорошего пространственного разрешения системы.



В настоящей работе приводятся лишь некоторые результаты измерений скоростей твердых частиц с целью демонстрации перспективности применения ОДИС для исследования течений типа «газ — твердые частицы».

Вид экспериментальной установки представлен на рис. 4. Луч света с длиной волны  $\lambda = 0,6328 \text{ мк}$ , генерируемый лазером (1) типа ЛГ-75, с помощью полупрозрачной пластинки (2) и плоского зеркала (3) расщепляется на два луча одинаковой интенсивности, которые длиннофокусным объективом (4) фокусируются в исследуемой точке потока. Наблюдение рассеянного на движущихся частицах света ведется по направлению биссектрисы угла пересечения лучей лазера. Объективом (6) рассеянный свет фокусируется на фотокатоде фотоприемника (8). Диафрагмы (5 и 7), совместно с объективом (6), играют роль пространственного фильтра, определяющего разрешение системы и препятствующего паразитной засветке ФЭУ. Сигнал с фотоприемника усиливается широкополосным усилителем (9). Для определения спектра сигнала применялся анализатор спектра (10) или селективный микровольтметр (11). Частота, соответствующая средней скорости частиц, находилась по максимуму спектра с помощью частотных меток, получаемых от генератора высокочастотных сигналов (12).

Типичный вид спектров сигналов от частиц дыма размером 1—2 мк и от частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  размером порядка 200 мк показан на рис. 5 а, б.

В данной работе исследовались течения со следующими параметрами: диапазон скоростей воздушной фазы изменялся в пределах от 10 до 100 м/сек. Концентрация частиц от  $1 \cdot 10^2$  до  $1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ , оптическая



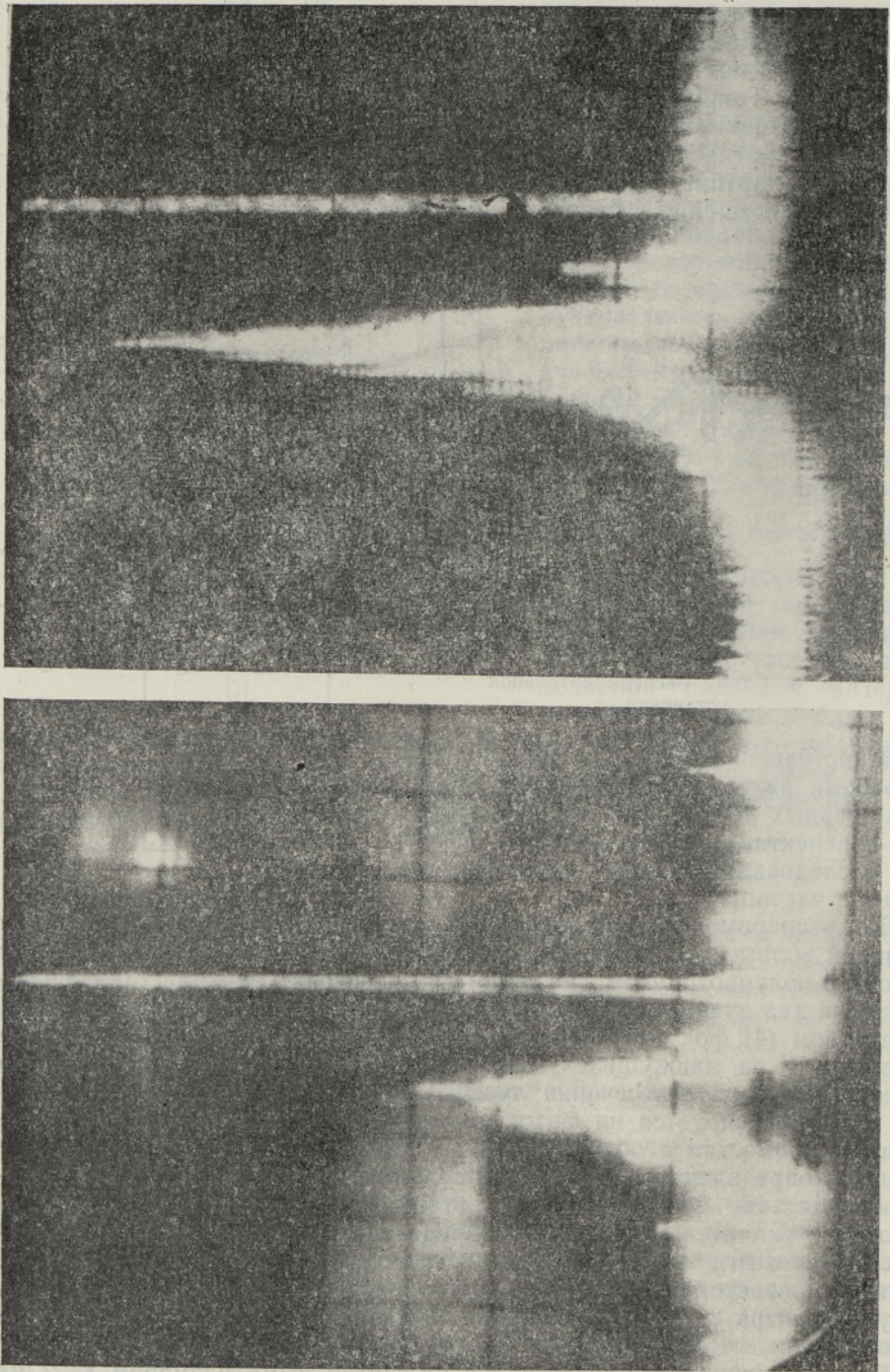


Рис. 5. Спектры доплеровских сигналов, полученные на экране анализатора спектра С48: а) от частиц дыма,  $D = 1$  мк; б) от частиц  $Al_2O_3$ ,  $D = 200$  мк. (Справа частотные метки).



плотность исследуемых потоков лежала в пределах  $0,1 \leq \tau \leq 1,4$ . Следует отметить, что параметры установки обеспечивали возможность измерения скоростей в интервале от 1 до 300 м/сек, причем последний мог быть значительно расширен за счет увеличения полосы пропускания аппаратуры и изменения геометрии схемы.

В процессе наладки сопоставлялись результаты измерений скорости воздушного потока, обозначенного частицами дыма размером порядка 1 мк, с непосредственными измерениями трубкой Пито. Профили скоростей, полученные обоими методами, практически совпадали.

Рис. 6. Профили скорости  $U_s$  частиц  $Al_2O_3$  при постоянной средней скорости воздуха:  $D = 14$  [○],  $20$  [-○-],  $23$  [-○-],  $67$  мк [●].  $U_{ср.возд.} = 37,7$  м/сек.

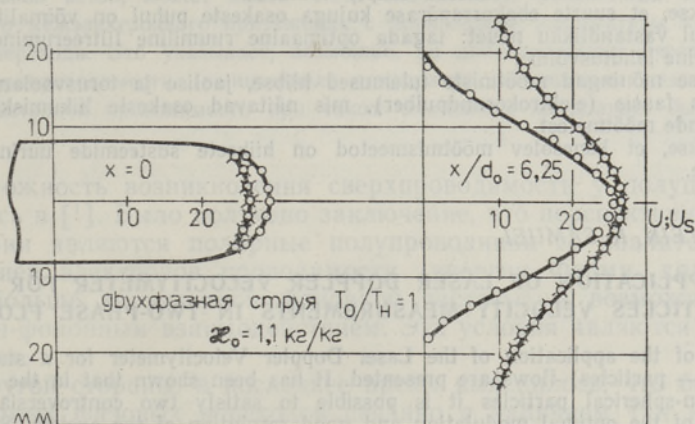
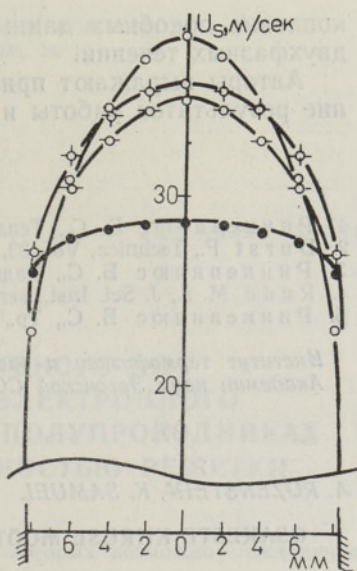


Рис. 7. Профили скоростей частиц  $Al_2O_3$  [-○-] и воздуха [○] в начальном сечении двухфазной струи и на расстоянии 6,25 калибра.

На рис. 6 приведены профили скоростей частиц при истечении двухфазной смеси из достаточно длинной трубы. С увеличением размера частиц профили скорости на выходе из трубы сглаживаются, приближаясь к равномерным для частиц порядка 100 мк (средняя скорость несущей фазы во всех опытах оставалась постоянной). На рис. 7 сопоставлены скорости фаз в начальном сечении двухфазной струи и на расстоянии нескольких калибров от него. Частицы размером порядка 70 мк в начальном сечении отстают от несущей фазы; по мере торможения газовой фазы частицы, как более инерционные, опережают ее.

Приведенная выше информация об относительном движении фаз пока не может быть получена никакими иными способами, что показывает перспективность применения оптических доплеровских измерителей скорости для исследования потоков типа «газ — твердые частицы». На-



копление подобных данных необходимо для решения задач механики двухфазных течений.

Авторы выражают признательность Б. С. Ринкевичюсу за обсуждение результатов работы и ценные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ринкевичюс Б. С., Теплофизика высоких температур, 8, 1973 (1970).
2. Durst F., Technica, Vol. 33, No. 408 (1971).
3. Ринкевичюс Б. С., Радиотехника и электроника, 14, 1930 (1969).
4. Rudd M. J., J. Sci. Inst., ser. 2, 2, 55 (1969).
5. Ринкевичюс Б. С., Тр. МЭИ, Физика, М., вып. 144, 48 (1972).

*Институт термофизики и электрофизики  
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
5/VII 1973

A. ROZENSTEIN, K. SAMUEL

#### OSAKESTE KIIIRUSE MÕÖTMINE HIBSES VOOLUSES LASERMÕODIKUGA

Käsitletakse dopplerilise laserkiirusmõõdiku rakendamist osakeste kiiruse määramiseks hõibses (gaas-tahked osakesed tüüpi) vooluses.

Näidatakse, et suurte ebakorrapärase kujuga osakeste puhul on võimalik rahuldada kaks üldjuhul vastandlikku nõuet: tagada optimaalne ruumiline filtreerumine ning süsteemi ruumiline lahutusvõime.

Esitatakse mõningad mõõtmiste tulemused hõibse, jaolise ja torusvoolamise kiiruste kohta tahkes faasis (elektrokorundpulber), mis näitavad osakeste liikumiskiiruse suurt sõltuvust nende mõõtetest.

Märgitakse, et kõnesolev mõõtmismeetod on hõibsete süsteemide uurimiseks väga perspektiivne.

A. ROSENSTEIN, K. SAMUEL

#### THE APPLICATION OF LASER DOPPLER VELOCITYMETER FOR SOLID PARTICLES VELOCITY MEASUREMENTS IN TWO-PHASE FLOWS

Results of the application of the Laser Doppler Velocitymeter for a study of two-phase (gas — particles) flows are presented. It has been shown that in the case of big (200  $\mu$ ) non-spherical particles it is possible to satisfy two controversial demands: the demand of the optimal modulation and good resolution of the system. Some results of measurements of velocity profiles of  $Al_2O_3$  particles are presented, showing a strong dependence of the velocity on the size of the particles.