

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПО ПРОСТРАНСТВЕННОМУ СПЕКТРУ ВОССТАНОВЛЕННЫХ С ГОЛОГРАММ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

ЕРТАНОВА О. Н., ЗУЕВ Ю. В., ЛЕПЕШИНСКИЙ И. А.,  
РЕШЕТНИКОВ В. А.

Одна из важных задач при экспериментальном исследовании двухфазных потоков состоит в измерении поля скоростей дисперсной фазы (твердые или жидкие частицы). Использование голографического метода двухэкспозиционной регистрации позволяет получать мгновенную информацию о пространственном поле скоростей частиц в потоке. При такой регистрации скорость отдельной частицы определяется по величине ее смещения за время между двумя экспозициями [1]. При визуальном анализе восстановленного с голограммы изображения частиц с помощью микроскопа [1] достоверность результатов снижается с увеличением концентрации частиц в потоке, так как усложняется структура двухэкспозиционного изображения и затрудняется поиск частиц, образующих пару. Кроме того, на изображение накладывается спекл-структура фона, также затрудняющая поиск частиц.

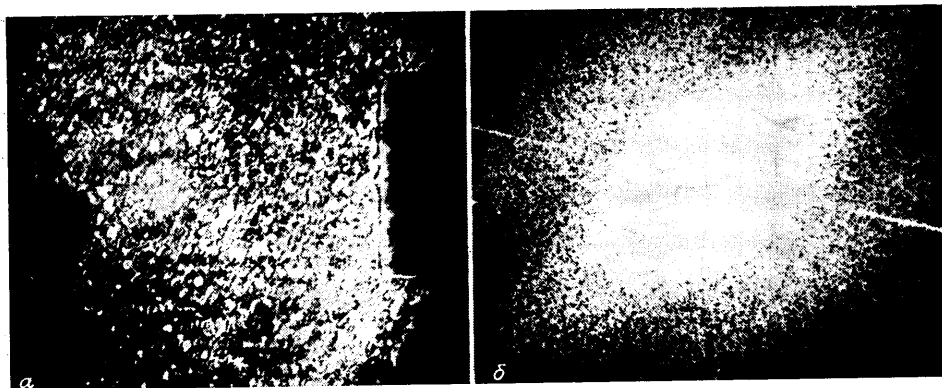
Упростить и ускорить процесс измерения поля скоростей частиц в потоке позволяет предложенный в [2] метод, основанный на анализе картины пространственного спектра двухфазного потока, восстановленной с двухэкспозиционной голограммы. Однако опыт применения метода показал, что измерить поле скоростей по спектру, восстановленному непосредственно с голограммы, не всегда удается в случае двухфазных потоков со сложной скоростной пространственной структурой. Это связано с тем, что в таком спектре содержится усредненная по направлению распространения луча информация о скорости всех зарегистрированных в объеме частиц. Поэтому появилась необходимость дальнейшего развития метода применительно к двухфазным потокам со сложной пространственной структурой.

В данной работе рассматривается метод измерения поля скоростей дисперсной фазы двухфазного потока по двухэкспозиционным голограммам, основанный на фотографической регистрации восстановленного с голограммы изображения и анализе пространственного спектра полученного фототранспаранта с использованием ЭВМ. Именно введение этапа фотографической регистрации позволяет измерять поле скоростей двухфазных потоков со сложной пространственной структурой. Регистрация восстановленного изображения осуществляется при помощи микроскопа, поле зрения и глубина резкости которого ограничивают измерительный объем. При этом из-за нелинейности процесса фотографической регистрации можно проводить предварительную пороговую обработку изображения и частично устранить спекл-структуру фона, что уменьшает уровень шумов, повышает контраст изображения и точность измерения скоростей. Как показали эксперименты, целесообразно также проводить обращение негатива. Пространственный спектр, восстановленный с таких изображений, содержит информацию о распределении локальных скоростей частиц, что и позволяет по нескольким фотографическим изображениям восстановить пространственное поле скоростей дисперсной фазы двухфазного потока. Проведение спектрального анализа с использованием ЭВМ существенно ускоряет процесс обработки изображений, а также позволяет получить более достоверные результаты по сравнению с анализом, проведенным в [2].

Предложенный метод измерения поля скоростей дисперсной фазы был экспериментально исследован на дозвуковой водовоздушной струе, истекающей из сопла, при следующих параметрах: диаметр начального сечения струи составлял 20 мм, средние скорости газовой и жидкой фазы — 3–50 м/с, концентрация частиц — до  $10^5$  см<sup>-3</sup>.

Голографирование зоны потока вблизи сопла проводилось на голографической установке УИГ-12 по двухлучевой схеме с пространственной фильтрацией в предметном пучке [1, 2] при работе рубинового лазера в режиме двух импульсов. Диаметр пучка, освещающего поток, составлял 20 мм. Разность хода опорного и предметного пучков выравнивалась с точностью  $\pm 2$  см. Изображение голографируемой зоны потока в масштабе 1:1 строилось объективом «Зоннар» (фокусное расстояние 185 мм, относительное отверстие 1:2) на расстоянии 8 см за голограммой. В фокальную плоскость объектива устанавливалась игла размером 0,1 мм для фильтрации нерассеянного на частицах света, что увеличивало контраст изображения. Диаметр записываемых голограмм 20 мм, а пространственное разрешение голографической схемы 5 мкм.

Обработка полученных голограмм по предложенному методу проводилась следующим образом. Освещение голограммы опорным лучом гелий-неонового лазера ЛГ-38 давало на расстоянии 8 см от голограммы объемное изображение зарегистрированного двухфазного потока. Путем последовательной перефокусировки оптической системы микроскоп — фотоаппарат различные участки объема изображения струи фотографировались на фотопленку «Микрат-300». Полученные фототранспаран-

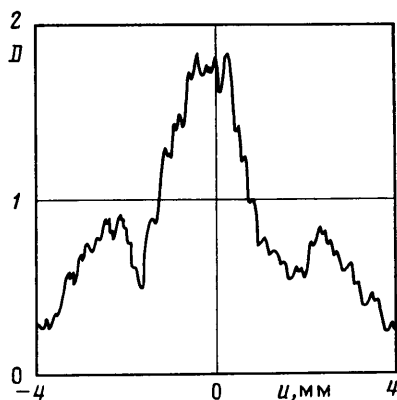


Фиг. 1

ты освещались коллимированным лучом гелий-неонового лазера ЛГ-38. Фурье-линза с фокусным расстоянием 250 мм, установленная за фототранспарантом, формировала в задней фокальной плоскости пространственный спектр части потока, зарегистрированного на фототранспаранте. Полученный пространственный спектр фотографировался на пленку «Микрат-300». Кривая фотометрирования зарегистрированной таким образом картины пространственного спектра, полученная на ИФО-451, обрабатывалась на ЭВМ ЕС-1033. В результате спектрального анализа, проведенного на ЭВМ, получалось распределение скорости частиц струи, зарегистрированной на фототранспаранте. Выполнив таким образом последовательную обработку транспарантов, можно определять поле скоростей частиц в струе.

На фиг. 1, а приведена фотография двухэкспозиционного изображения участка струи, восстановленного с голограммы. Направление движения частиц слева направо. В правой части фотографии виден зонд диаметром 3 мм (одновременно с голографированием проводилась регистрация параметров потока зондовым методом [3]).

На фиг. 1, б показана фотография картины пространственного спектра участка струи, изображенного на фиг. 1, а. На фотографии достаточно отчетливо видны полосы, направленные под углом к горизонтальной оси. Анализ кривой, полученной при фотометрировании перпендикулярно направлению этих полос и представленной на фиг. 2 ( $u$  — координата пространственного спектра,  $D$  — оптическая плотность), проводился вручную (по минимумам интерференционных полос, как и в [2]) и на ЭВМ по программе быстрого преобразования Фурье. Он показал, что исследуемый поток является двухскоростным. Одни частицы движутся под углом  $45^\circ$  от горизонтальной оси (по направлению фотометрирования) со скоростью  $0,56 \pm 0,05$  м/с, что видно из картины пространственного спектра и легко получается при обработке вручную. Другие частицы в указанном направлении имеют среднюю скорость  $3,5 \pm 0,4$  м/с, что достоверно получить удалось только в результате машинной обработки кривой фотометрирования. Результаты спектрального анализа, выполненного на ЭВМ для определения большей скорости частиц, приведены ниже:



Фиг. 2

$V$ , м/с	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0	7,7
$A$ , отн. ед.	0,33	0,75	1,0	0,67	0,08	0,14	0,19	0,28	0,19

Наблюдаемый локальный максимум при скорости 7,0 м/с связан с нелинейностью денситометрической характеристики пленки «Микрат-300». Для определения направления этих частиц пространственный спектр фотометрировался еще в горизонтальном и вертикальном направлениях, и по результатам машинной обработки было найдено, что частицы движутся в горизонтальном направлении со средней скоростью  $4,9 \pm 0,4$  м/с. Отметим, что такие результаты по пространственному спектру, восстановленному непосредственно с голограммы [2], получить не удалось. Не позволил получить такие результаты и зондовый метод [3], дающий лишь среднюю скорость частиц.

Итак, рассмотренным методом было установлено, что исследуемый ансамбль частиц в струе является двухскоростным и двунаправленным: часть частиц движется в горизонтальном направлении со средней скоростью  $4,9 \pm 0,4$  м/с, другие — под углом  $45^\circ$  от оси струи со скоростью  $0,56 \pm 0,05$  м/с.

В заключение отметим, что введение этапа фотографической регистрации восстановленного с голограммы изображения хотя и удлиняет процесс обработки, но позволяет получать более точно пространственную структуру поля скоростей. Проведение на ЭВМ спектрального анализа кривых фотометрирования дает возможность автоматизировать процесс измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ертанова О. Н., Лепешинский И. А., Решетников В. А. Голографический анализ дисперсной фазы двухфазного потока // Теплофизика высоких температур. 1979. Т. 17. № 4. С. 819—821.
2. Вакрунов А. О., Ертанова О. Н., Лепешинский И. А. и др. Голографический метод определения поля скоростей дисперсной фазы двухфазного потока // Изв. АН СССР. МЖГ, 1980. № 1. С. 182—184.
3. Бажанов В. И., Зуев Ю. В., Лепешинский И. А. Зондовый метод измерения параметров фаз двухфазного двухкомпонентного потока // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Харьков: Харьков авиац. ин-т. 1978. Вып. 1. С. 123—128.

Москва

Поступила в редакцию  
25.IV.1986

УДК 533.6.011

### СИЛЬНОЕ ИСПАРЕНИЕ ГАЗА С ТРЕХМЕРНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

АБРАМОВ А. А., ТЕЛЕГИН П. Н.

При помощи уравнения Больцмана методом прямого статистического моделирования решается задача о сильном испарении вещества с трехмерной периодической поверхности, имеющей неоднородности характерного размера порядка длины свободного пробега молекулы. Получены граничные условия скольжения для уравнений гидродинамики Эйлера, описывающих течение вне кнудсеновского слоя в зависимости от определяющих параметров. Решение задачи проводилось на двухпроцессорной ЭВМ в режиме параллельной обработки. Обсуждаются некоторые аспекты распараллеливания задач кинетической теории газов, решаемых методом прямого статистического моделирования на многопроцессорных ЭВМ.

В режиме сильного испарения (конденсации) газа, когда нормальная составляющая среднemasовой скорости газа в кнудсеновском слое имеет порядок тепловой скорости молекулы  $C_T = (2kT/m)^{1/2}$ , функция распределения молекул по скоростям вблизи поверхности отличается от локально-равновесной (максвелловской) на свою величину. С целью получения граничных условий скольжения для уравнений газодинамики Эйлера необходимо в кнудсеновском слое решить нелинейное уравнение Больцмана. Обзор работ, в которых рассматривалась задача получения граничных условий в случае плоской поверхности, приведен в [1]. Влияние шероховатости поверхности рассматривалось для случая испаряющейся двумерной периодической поверхности с величиной шероховатостей порядка длины свободного пробега молекул [2]. Важным остается вопрос о влиянии трехмерных шероховатостей. В этом случае течение в кнудсеновском слое трехмерное, что приводит к усложнению решения уравнения Больцмана.

1. Рассмотрим трехмерную испаряющуюся поверхность (фиг. 1), представляющую собой бесконечную плоскость с периодически расположенными одинаковыми углублениями (порами), имеющими форму прямоугольного параллелепипеда. Характерные размеры пор и пространственных периодов имеют величину порядка длины свободного пробега молекулы  $l_w = (\sqrt{2}n_{ev}\sigma)^{-1}$ . Предположим, что функции распределения для испаренных и отраженных молекул имеют вид

$$f_{ev} = a_w n_{ev} F_w, \quad f_r = n_r F_w, \quad F_w = (h_w/\pi)^{3/2} \exp(-h_w \xi^2)$$

где  $n_{ev}$  — плотность насыщенного пара материала поверхности при температуре поверхности  $T_w$ ,  $a_w$  — коэффициент прилипания молекул к поверхности,  $\xi$  — скорость молекулы,  $h_w = m/2kT_w$ ,  $m$  — масса молекулы,  $k$  — постоянная Больцмана,  $n_r$  — плотность отраженных поверхностью молекул.