

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕНЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

*С. Д. Соломонов, Г. Г. Спирин*

*(Москва)*

Описывается метод визуализации непрерывного профиля скорости в низкоскоростных потоках диэлектрических и проводящих жидкостей. Приведены примеры, иллюстрирующие применение метода для различных видов и режимов течения.

Известно, что измерение малых скоростей при помощи термоанемометров, трубок Пито и т. п. приводит к погрешностям, обусловленным вязкостными эффектами и конвекцией. В связи с этим широкое распространение получили оптические и визуальные методы измерения [1-10].

Ниже рассматривается метод нагретой нити, представляющий собой развитие и усовершенствование известного метода тепловых меток, применяемого для визуализации и измерения скоростей газовых потоков [1, 6, 8].

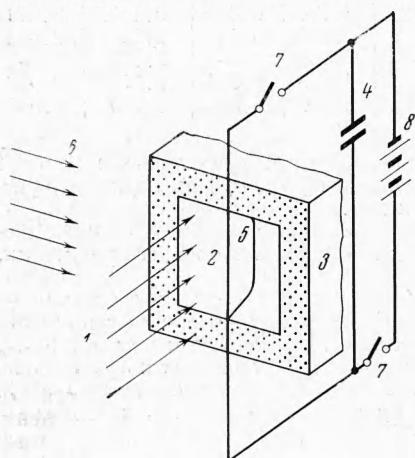
Схема наблюдения показана на фиг. 1 и заключается в следующем: поперек исследуемого потока 1 натягивается тонкая металлическая проволока 2 (канал 3 может быть открытого или закрытого типа), на проволоку с рабочего конденсатора 4 подается короткий электрический импульс, в результате чего вокруг проволоки образуется равномерный (по длине проволоки) температурный фронт, который на экране теплового прибора появляется в виде белой полосы на темном фоне.

В результате движения жидкости по каналу температурный фронт сносится, образуя полный профиль скорости 5 в канале (на схеме 6 — световой поток теплового прибора, 7 — выключатели, 8 — источник питания конденсатора).

От времени и характера формирования температурного фронта зависит вопрос о пригодности метода для исследования того или иного вида или режима течения. В основе метода лежит условие несоизмеримости времени образования температурного фронта в слое жидкости вокруг проволоки с временем перемещения массы жидкости на участке сноса фронта, т. е. скоростью течения. В результате этого условия рассматриваемый метод применим лишь для исследования низкоскоростных потоков с диапазоном скоростей в пределах от 0.002 до 0.2 м/сек, причем расширение этого диапазона (в большую сторону) можно осуществить только за счет сокращения времени формирования температурного фронта. Нижняя граница применимости метода определяется временем существования видимого градиента в жидкости и разрешающей способностью теплового прибора.

При выборе электрических параметров  $R$ ,  $C$ ,  $U$ , определяющих процесс формирования температурного фронта в жидкости, необходимо руководствоваться требованием получения четкого, контрастного изображения на экране теплового прибора. Увеличение напряжения на конденсаторе  $U$  (или емкости), определяющего градиент температуры в слое жидкости около проволоки, ограничено некоторым критическим значением  $U_*$ , с превышением которого температурный фронт начинает искажаться, приобретая неровные очертания, что значительно затрудняет расшифровку получаемых результатов. Было обнаружено, что увеличение напряжения проволоки приводит к выравниванию температурного фронта. Очевидно, такие изменения связаны с механическими колебаниями, которые возникают при резком разогреве и охлаждении проволоки. Режим разогрева проволоки подбирается экспериментально. Например, при использовании никромовой проволоки диаметром 0.09 мм в канале площадью  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  и конденсатора емкостью 50 мкФ предельно допустимое напряжение, при котором температурный фронт еще остается равномерным, составляет 40 в.

С другой стороны, увеличение напряжения  $U$  ограничено возможностью появления конвекции температурного фронта, которая может привести к искажению профиля скорости, особенно для тех видов и режимов течения, когда скорость исследуемого потока соизмерима со скоростью всплыивания температурного фронта. В этих случаях необходимо либо учитывать эту конвекцию, что усложнит расшифровку получаемых результатов, либо ее существенно уменьшить. Уменьшение конвекции, осуществляя

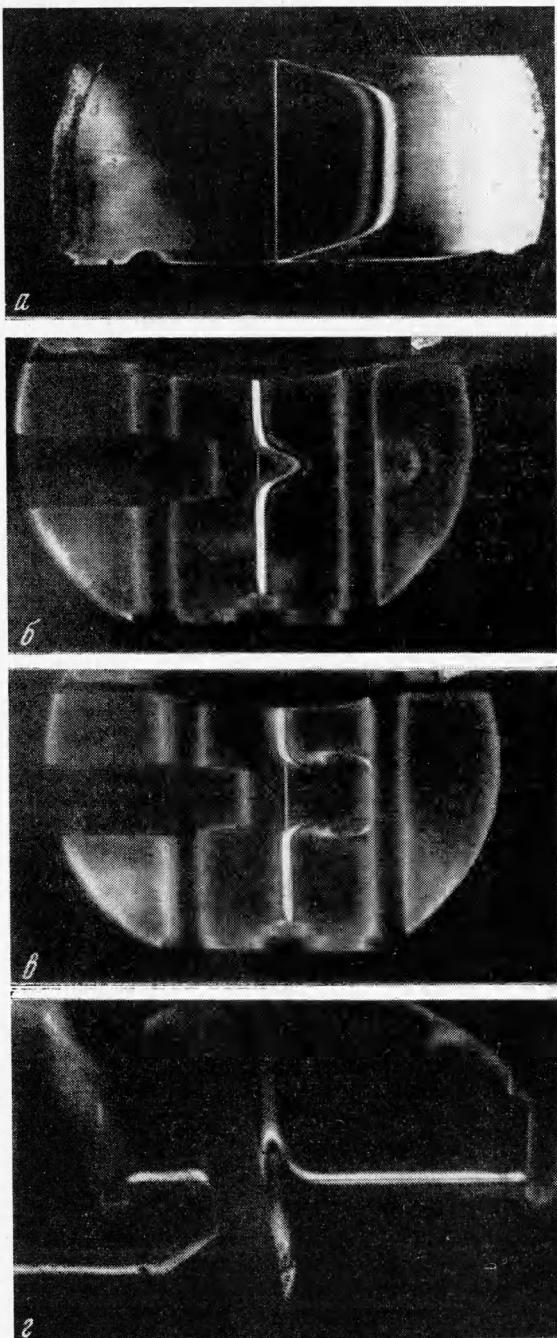


Фиг. 1

емое за счет уменьшения температуры разогрева слоя жидкости около проволоки, приводит к ухудшению качества изображения. Однако соответствующим подбором напряжения можно добиться хорошего качества изображения, при котором влиянием конвекции можно полностью пренебречь. Экспериментальные исследования процесса формирования температурного фронта показали, что уже при разогреве столба жидкости на  $\Delta T \approx 1^\circ\text{C}$  удается получить хорошее качество изображения. В этом случае конвекция не развивается даже при горизонтальном расположении проволоки.

Фотографии, полученные при помощи теневого прибора ИАБ-451 (фиг. 2), иллюстрируют некоторые случаи применения метода нагретой нити. На фиг. 2, а приведен профиль скорости во входном участке прямоугольного гидроканала,  $v = 0.05 \text{ м/сек.}$  На фиг. 2, б приведен профиль скорости в затопленной струе,  $v = 0.008 \text{ м/сек.}$  Истечение происходит из выдвинутого вперед насадка, визуализирующая нить натянута вертикально. На фиг. 2, в сфотографирован вихрь, образовавшийся в начальный момент истечения из насадка. Возможность исследования структуры больших низкочастотных завихрений является одним из достоинств метода. На фиг. 2, г приведен профиль скорости в конвективном потоке около вертикальной стенки (стенка наклонена). Конвективная струя вытекает из отверстия в центре стенки (в проекции отверстия не видно). Визуализирующая нить натянута горизонтально. Эксперименты проводились на водопроводной и дистиллированной воде.

В заключение следует отметить, что метод нагретой нити может применяться для визуализации поля скоростей в каналах открытого и закрытого типа в потоке диэлектрических и проводящих жидкостей. Однако использование в качестве рабочей жидкости растворов электролита кроме шунтирующего действия приводит к образованию на проволоке газовой пелены (за счет электролизма), значительно ухудшающей условия теплообмена проволоки с жидкостью, в результате чего контрастность теневой картины резко падает. В этом случае необходимо применение различного рода защитных покрытий, типа эмалей, близких по своим теп-



Фиг. 2

лофизическим свойствам к материалу проволоки. Эмаль желательно наносить на проволоку в виде тонкого слоя порядка одного микрона.

Поступила 24 II 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Т р о х а н А. М. Измерение скорости газовых потоков кинематическими способами. ПМТФ, 1962, № 2.
2. S c h r a u b F. A., K l i n e S. J. R u n p s t a d l e r P. W. Jr., H e n g r y J., L i t t e l l A. Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time-dependent velocity fields in low-speed water flows. Trans. ASME, Ser. D, J. Basic Engng, 1965, vol. 87, No. 2. (Рус. перев.: Использование пузырьков водорода для количественного изучения изменяющихся во времени полей скоростей в низкоскоростных водяных потоках. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., Сер. Д, Теорет. основы инж. расчетов, 1965, № 2).
3. Г е р м а н В. Л., Л а з е б н ы й А. А. Оптический метод исследования потоков вязкой несжимаемой жидкости. Вестн. Харьковск. ун-та, Записки механ-матем. факультета, 1966, т. 32, № 14. \*
4. D a v i s W., F o x R. W. An evaluation of the hydrogen bubble technique for the quantitative determination of fluid velocities within clear tubes. Trans. ASME. Ser. D, J. Basic Engng. 1967, vol. 89, No. 4. (Рус. перев.: Использование метода визуализации течения с помощью пузырьков водорода для измерения скорости жидкости в прозрачных трубах. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., Сер. Д, Теорет. основы инж. расчетов, 1967, № 4).
5. C o l d s t e i n R. J., K r e i d D. K. Measurement of laminar flow development in a square duct using a laser-Doppler flowmeter. Trans. ASME. Ser. E, J. Appl. Mech., 1967, vol. 34, No. 4. (Рус. перев.: Применение лазера для исследования ламинарного течения в квадратном канале с использованием эффекта Дошпера. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., Сер. Е, Прикл. механ., 1967, № 4).
6. Т р о х а н А. М. Измерение скорости газовых и плазменных потоков. Измерит. техника, 1968, № 8.
7. Д е р е в я н к о Н. Ф., Л а т ы ш е в В. М., Т р о х а н А. М. О частотном методе измерения скорости течения жидкости. ПМТФ, 1968, № 5.
8. S c h w a r z M. J. R., W e i n b e r g F. J. Laser techniques in combustion research. Combust. and Flame, 1969, vol. 13, No. 4.
9. Д е р е в я н к о Н. Ф., Л а т ы ш е в В. М., Т р о х а н А. М. Исследование течений жидкости оптическим корреляционным методом. Измерит. техника, 1969, № 4.
10. Л е б е д е в И. В., Р и к н е в и ч ю с В. С., Я с т р е б о в а Е. В. Измерение локальных скоростей мелкомасштабных потоков с помощью ОКГ. ПМТФ, 1969, № 5.

#### СТРУКТУРА СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ АРГОН-ГЕЛИЕВОЙ СМЕСИ В ВАКУУМЕ

**A. A. Бочкарёв, B. A. Косинов, B. Г. Приходько, A. K. Ребров**  
(Новосибирск)

Представлены результаты экспериментального исследования бародиффузионных процессов в сверхзвуковых струях смеси аргона и гелия при помощи пучка электронов.

Впервые бародиффузионный эффект разделения в струе газовой смеси был обнаружен Бекером [1]. В серии последующих работ [2-4] изложены результаты исследования этого эффекта газодинамическими методами. Попытки количественного расчета были сделаны Циганом [5] и Шерманом [6]. Работы [7-9] основаны на применении электронно-пучковой диагностики, которая не вносит возмущений в сверхзвуковой поток и позволяет получить действительную картину течения газовых смесей.

Ниже изложены новые результаты исследования эффектов в градиентных потоках.

**1. Техника и методика экспериментов.** Экспериментальная установка представляет собой газодинамическую трубу низкой плотности производительностью около 50000 л/сек, оборудованную электронно-пучковой аппаратурой для измерения плотности. Принципиальная схема установки показана на фиг. 1, а. Рабочая камера 1 присоединена к ресиверу 3 через затвор 2. Откачка ресивера и камеры производится