

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОТОКОВ**

*А. М. Трохан,
И. Л. Кузнецов, Г. Р. Баранова, Ю. В. Игнатенко
(Новосибирск)*

При измерении турбулентности потока в настоящее время наибольшее распространение получил метод термоанемометра. Однако этот метод совершенно неприменим к исследованию потоков с высокой температурой ($t > 400^\circ \text{C}$). Даже в случае неизотермического потока со сравнительно низкой средней температурой он требует применения дополнительного устройства для компенсации температурных пульсаций, что, в свою очередь, влечет за собой усложнение прибора, увеличение трудоемкости обработки и уменьшение точности измерений. Кроме того, как всякий другой зонд, термоанемометр, будучи введен в исследуемую среду, искажает ее, что само по себе может явиться причиной значительных систематических погрешностей, например, при измерениях в пограничном слое вблизи стенки. В связи с этим в последнее время для исследования турбулентности потоков стали применять трассирование мелкими частицами, причем мгновенные скорости частиц регистрируются стробоскопическим фотографированием.

Применение трассирования освобождает от недостатков зондовых методов и позволяет исследовать турбулентность в потоках с достаточно высокой температурой (3—4 тыс. градусов), а также проводить измерения в химически активных потоках.

Применяемые для трассирования частицы должны удовлетворять довольно жестким требованиям безынерционности, чтобы в достаточной степени увлекаться пульсациями потока. Этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Стробоскопическое фотографирование дает мгновенные значения скоростей и, следовательно, для получения достаточно точных вероятностных характеристик турбулентного потока необходима обработка и осреднение большого количества (порядка нескольких тысяч) измерений, что является главным недостатком этого метода регистрации. Помимо этого, в случае большой средней скорости потока необходимая частота стробоскопической съемки становится высокой, поскольку длина стробоскопической трассы должна быть соразмерна с масштабом турбулентности потока; практическое осуществление такого стробоскопа представляется невозможным.

Изложенный ниже способ регистрации позволяет сравнительно просто и с большой точностью определить амплитудный спектр пульсаций скорости турбулентного потока, а также найти среднюю скорость течения.

Исследуемый участок потока с трассирующими частицами проектируется с помощью оптической схемы на плоский экран с двумя параллельными щелями (рис. 1). В случае низкотемпературного потока этот

участок освещается интенсивным внешним источником, тогда как при достаточно высокой температуре можно использовать самосвечение частиц. В момент времени, когда изображение светящейся частицы попадает на щель, на выходе фотоумножителя возникает импульс напряжения, который затем усиливается ($k=50\,000$) и дискриминируется. Выходной импульс канала, связанного с первой по ходу потока щелью экрана, используется для запуска развертки осциллографа; импульс второго ка-

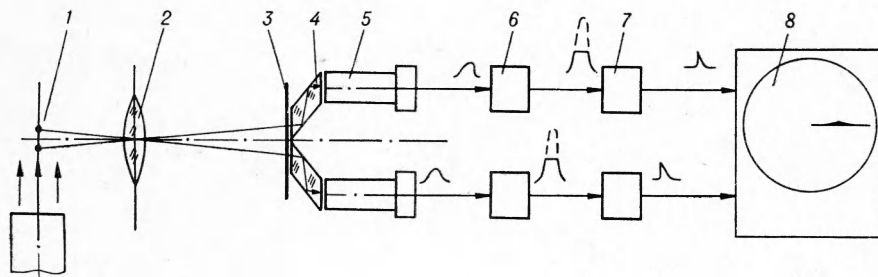


Рис. 1. Схема прибора для измерения турбулентности:

1 — объект исследования; 2 — объектив; 3 — экран со щелями; 4 — призма; 5 — ФЭУ; 6 — усилитель; 7 — дискриминатор; 8 — осциллограф.

нала подается на вход усилителя Z . В момент попадания изображения светящейся частицы на вторую щель на экране осциллографа возникает яркая вспышка. (В остальное время луч осциллографа заперт.) Поскольку скорость различных частиц в турбулентном потоке неодинакова, то яркие вспышки возникают на различных расстояниях от места запуска, группируясь около точки, соответствующей наиболее вероятному времени пролета частиц между щелями. Фотографирование экрана осциллографа с длительной экспозицией (в описываемых экспериментах около пяти минут) и последующее фотометрирование негатива дает, при известной характеристике пленки, плотность вероятности распределения вспышек по экрану. Отсюда легко получить амплитудный спектр продольных пульсаций скорости потока. Использование осциллографа с зеленым свечением экрана нежелательно, так как большинство фотопленок мало чувствительно к зеленому свету. Для получения характеристики пленки (зависимость плотности почернения от экспозиции) в качестве источника света используется луч того же осциллографа, причем яркость луча должна быть одинаковой с яркостью вспышек.

Нетрудно заметить, что длина участка потока, на котором производится измерение (произведение расстояния между щелями на масштаб проектирования), может быть выбрана любой путем подбора оптической системы.

Описанный метод применялся для исследования турбулентного потока в специальном горелочном устройстве с турбулизирующими решетками. В случае изотермического потока результаты измерений сравнивались с показаниями термоанемометра постоянной температуры. В качестве примера на рис. 2 приведены амплитудные спектры пульсаций потока с различными степенями турбулентности (ϵ). Результаты сравнения с термоанемометром (рис. 3) показывают, что рассматриваемый метод дает несколько более высокие значения степени турбулентности потока, однако это расхождение сравнительно невелико. Применение описанного метода для исследования турбулентности в продуктах сгорания и в зоне горения углеводородных топлив также дало положительные результаты.

Наиболее жестким ограничением области применения методов трассирования является, как уже упоминалось, требование относительной безынерционности частиц. Чтобы оценить, насколько точно частицы следуют за потоком, решалась задача о движении частицы в гармонич-

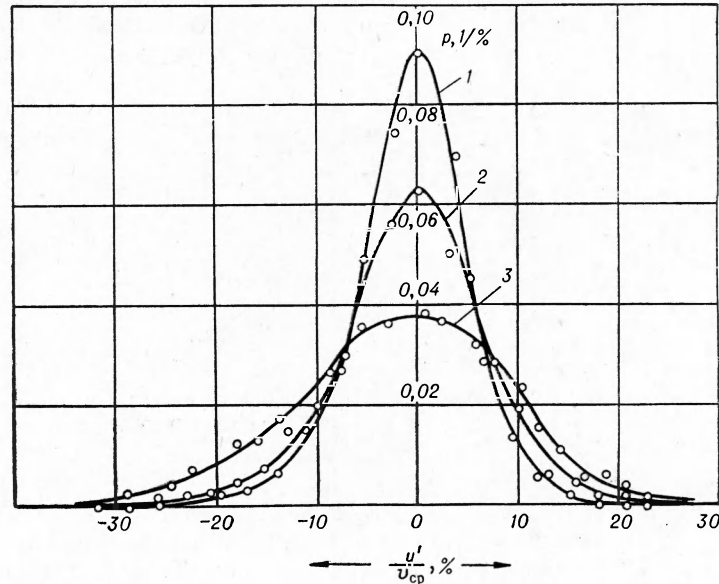


Рис. 2. Амплитудные спектры пульсаций потока для различных степеней турбулентности.

1 — $\varepsilon=4,4\%$; 2 — $\varepsilon=6,5\%$; 3 — $\varepsilon=10,2\%$.

чески колеблющейся жидкости. Поскольку движение частицы в этом случае нестационарно, а закон сопротивления нестационарному движению при малых числах Re для частиц произвольной формы не известен, при расчете частицы заменялись шариками из того же материала, имеющими равную скорость седиментации [1]. (В настоящих опытах для трассирования использовались частицы алюминиевой пудры, помещенной в вертикальный цилиндр известного диаметра. Ко дну цилиндра подводился воздух небольшого расхода, который поднимал часть частиц и затем подавался в рабочий поток. Таким образом, зная расход воздуха и диаметр цилиндра, можно найти наибольшую скорость седиментации v_s в каждом опыте.)

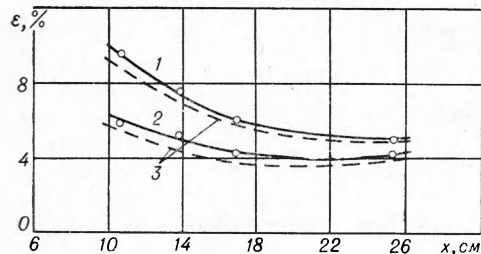


Рис. 3. Степени турбулентности в ядре потока на различных расстояниях от тубулизирующей решетки.

1 — диаметр прута 5 мм; 2 — диаметр прута 2 мм; 3 — термоанемометр.

Уравнение движения в этом случае имеет вид:

$$m \frac{dv}{dt} + \frac{9}{4} m' \beta \frac{d(v_{ж} - v)}{dt} - \frac{9}{4} m' \omega \beta (v_{ж} - v) - \frac{9}{4} m' \omega \beta^2 (v_{ж} - v) = 0,$$

где m — масса частицы; m' — масса вытесненной ею жидкости; ω — круговая частота колебаний жидкости,

$$\beta = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho_{ж}}}; \quad r = \sqrt{4,5 \frac{\mu v_s}{\rho_a \cdot g}}$$

радиус шарика; μ — динамическая вязкость; $\rho_{ж}, \rho_a$ — плотности жидкости и частицы; v — скорость частицы; $v_{ж} = v_{0ж} \sin \omega t$ — скорость жидкости.

Решение искалось в виде гармонических колебаний той же частоты:

$$v = v_0 \sin(\omega t - \alpha).$$

В результате для фазы колебаний α получено выражение:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{1 + \beta}{\frac{9}{2} \frac{\rho_{ж}}{\rho_a} \left(\beta + \beta^2 + \frac{1}{2} \beta^3 \right) - 1};$$

а для относительной амплитуды колебаний:

$$\frac{v_0}{v_{0ж}} = \frac{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + 1}}{(\beta + 1) \operatorname{tg} \alpha - \frac{4}{9} \frac{\rho_a}{\rho_{ж}} \cdot \frac{1}{\beta} + 1}.$$

Полученные соотношения позволяют оценить применимость частиц для трассирования, если задаться ожидаемыми значениями пульсаций скорости потока u' и масштабом турбулентности l . Тогда характерная круговая частота ω определяется из соотношения:

$$\omega = 2\pi \frac{u'}{l}.$$

Приведенные выше соотношения, безусловно, можно рассматривать только как оценочные, поскольку действительная картина турбулентного течения в лагранжевой системе отсчета не может быть аппроксимирована гармоническими колебаниями.

Описываемый метод достаточно прост. Кроме фотоэлектрического датчика, он использует только обычные стандартные элементы лабораторной электроники. Фотографирование экрана осциллографа и последующее фотометрирование негатива занимает больше времени, чем получение результата при использовании термоанемометра, однако этот недостаток легко устраняется, если для регистрации используется временной анализатор импульсов [2].

Схема прибора (рис. 1) может быть видоизменена. Вместо двухканального варианта может быть использован одноканальный вариант измерения. В этом случае свет через обе щели в экране попадает на один и тот же фотоумножитель, а импульсы, снимаемые с дискриминатора, одновременно и запускают развертку и отпирают луч. Если число трассирующих частиц, регистрируемых в единицу времени, достаточно мало (а это легко достигается регулировкой уровня дискриминации или усиления), то практически всегда оказывается, что запускают развертку импульсы, проходящие через первую щель экрана, и работа схемы ничем не отличается от двухканального варианта. Использование фото-

электрического датчика с одним фотоумножителем предельно упрощает его конструкцию и позволяет работать с одним усилителем и дискриминатором. В наших экспериментах одноканальная схема измерения работала так же надежно, как и двухканальная.

Описываемый метод может быть использован для получения локальных значений турбулентности не только в холодных потоках и прозрачных пламенах, но и в оптически непрозрачных средах. В этом

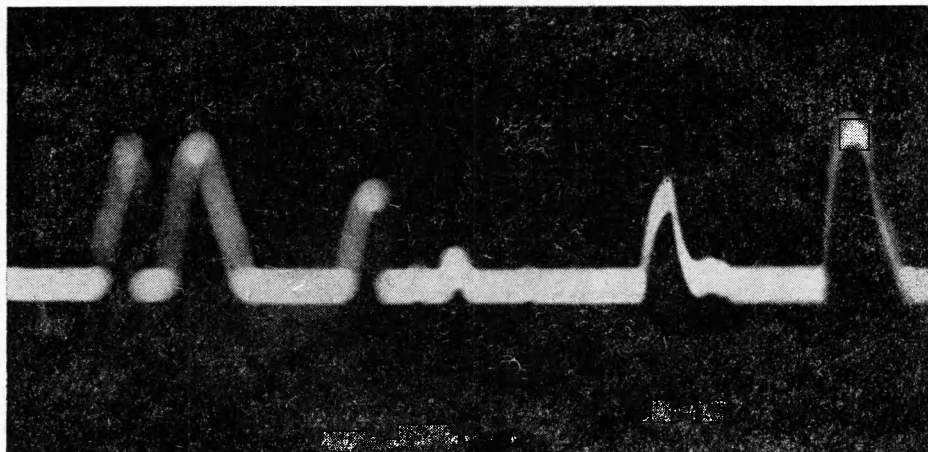


Рис. 4. Осциллограмма импульсов рентгеновского излучения от трассирующих частиц, облучаемых пучком быстрых электронов.

случае для подсветки трассирующих частиц используется пучок быстрых электронов, а регистрируется рентгеновское излучение, испускаемое частицами при попадании в область облучения. Регистрация времени пролета между двумя фиксированными точками осуществляется таким же образом, как и при оптическом варианте. В качестве примера на рис. 4 приведена осциллограмма, на которой зарегистрированы импульсы рентгеновского излучения, возникающие при пролете взвешенными в газе частицами CaWO_4 (линейный размер 10—20 мк) через область потока, облучаемую тонким пучком (30 кэВ) электронов.

Поступила в редакцию
23/XI 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Фукс. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.
2. Е. И. Фирсов, А. Ф. Чернявский, С. С. Шушкевич. ИТЭ, 1965, 2, 5.