

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

А. М. Трохан

(Новосибирск)

Многощелевая приставка к фоторегистру. Основным инструментом для измерения скорости плазмы, содержащей оптические неоднородности, в настоящее время является фоторегистр. Главными достоинствами использования фоторегистров наряду с высокой надежностью, свойственной подавляющему большинству кинематических способов измерения [1], являются: непрерывность регистрации в течение некоторого промежутка времени, чрезвычайно высокое временное разрешение и простота используемого оборудования. Недостатком же использования фоторазвертки является возможность измерения скорости плазмы лишь вдоль одной прямой, выделяемой в изображении потока щелью фоторегистра. Для измерения поля скоростей плазмы обычно применяют покадровую съемку. Однако использование покадровой съемки ввиду трудности отождествления неоднородностей на снимках оказывается ограниченным, находя применение главным образом для исследования ударных волн и потоков, содержащих резко неоднородные области или частицы.

Автором применено весьма простое устройство, позволяющее использовать фоторегистр для измерения полей скорости плазмы.

Принцип работы устройства ясен из фиг. 1. Вблизи исследуемого потока плазмы, содержащего какие-либо неоднородности 1, помещается непрозрачная диафрагма 2, имеющая ряд параллельных щелей, расположенных на различной высоте по сечению потока. Пучки света, проходящие сквозь эти щели, разнесаются при помощи перископа в направлении, параллельном скорости потока и выходят сквозь щели в диафрагме 3. В результате развертки изображения выходных щелей, производимой обычным методом, получаем многодорожечную фоторегистрограмму, позволяющую найти поле скоростей потока в исследуемом сечении и изменение его в течение времени развертки.

Конструкция пятищелевого перископа, собранного на зеркалах, представлена на фиг. 2, а пример результата, получаемого при его использовании, приведен на фиг. 3. На этой фоторегистрограмме зафиксировано распространение отраженной волны в ударной трубе.

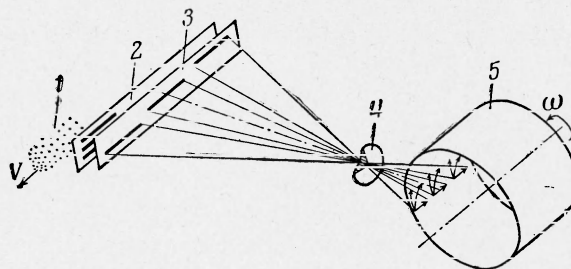
Следствием наличия разности хода лучей в перископе является необходимость достаточного диафрагмирования объектива для получения нужной глубины резкости. Например, максимальная разность хода лучей в перископе, показанном на фиг. 2, составляет 220 мм. Принимая максимальную величину кружка рассеяния равной 0.1 мм, а масштаб изображения равным 1 : 10, находим максимальное относительное отверстие объектива равным 1 : 10.

Другим следствием наличия разности хода лучей является некоторое различие масштаба изображения для дорожек записи на фоторегистрограмме. Наиболее удобно для определения масштаба изображений применять измерение ширины дорожек регистрограммы. Ширина дорожки равна длине соответствующей входной щели в масштабе изображения, а истинные размеры щелей известны, поэтому определение масштаба с достаточной точностью не представляет труда.

Фотоэлектрическая регистрация времени прохождения оптических неоднородностей. Использование фоторегистра, особенно многощелевого, позволяет получить весьма обширную информацию о динамической структуре исследуемых потоков. Однако не всегда оказывается удобным получать результаты в виде фотоснимка. Так например, если требуется статистическая обработка результатов измерения по времени, использование фотографической регистрации приводит к весьма большой трудоемкости работ. Кроме того, фотографическая регистрация затруднительна, если свечение потока слабо. В таких случаях более удобной оказывается фотоэлектрическая регистрация.

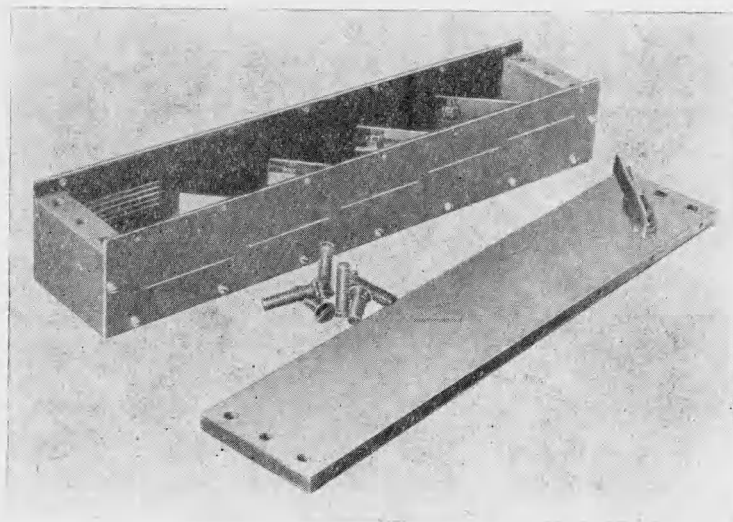
В настоящее время фотоэлектрическая регистрация довольно широко используется для исследования ударных процессов.

В данной работе регистрация времени пролета оптических неоднородностей при помощи фотоумножителей использовалась для измерений скорости течения газа в плазматроне переменного тока. Была использована следующая схема измерения. На



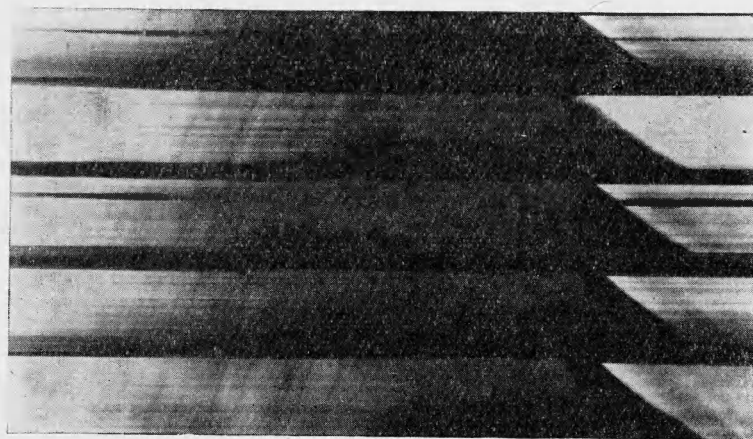
Фиг. 1. Схема измерений многощелевым перископом

некотором расстоянии вдоль по потоку вблизи исследуемой области течения помещались два фотоумножителя с соответствующими диафрагмирующими устройствами, выделяющими узкие пучки света. Прохождение неоднородностей (пиков яркости) мимо первого из умножителей вызывало запуск ждущей развертки осциллографа, а сигналы на втором умножителе вызвали вертикальное отклонение луча. Измерение времени



Фиг. 2. Пятищелевой зеркальный перископ

между моментом запуска развертки и прохождением неоднородности, вызвавшей запуск, мимо второго умножителя, позволяет найти скорость плазмы, среднюю на заданной базе. При данной схеме измерения возможна регистрация как однократная, так и осредненная по времени. На фиг. 4 представлен результат измерения, полученный



Фиг. 3. Пятидорожная фоторегистрограмма распространения ударной волны

путем наложения осциллограмм для примерно двухсот пролетов неоднородностей. Регулируя время экспозиции экрана осциллографа, можно получить как угодно большое временное осреднение результатов, а используя фотографирование экрана на непрерывно движущуюся пленку, можно зафиксировать изменение скорости потока по времени.

Схема совпадений. Наиболее общим методом получения статистических характеристик потока является дифференциальный анализ вероятности времен пролета оптических неоднородностей. Схема установки для такого анализа дана на фиг. 5.

Сигналы от двух исследуемых точек потока поступают на фотоумножители 1, а затем на катодные повторители 2 и делители 3. Делители используются для того, чтобы даже при значительной разнице в уровне сигнала от исследуемых точек потока на выходе получить сигналы примерно одинаковой амплитуды. Сигналы обоих каналов подаются на одинаковые линии задержки 4, а затем на счетчик совпадений 5.

Принцип измерения заключается в следующем: оптические неоднородности (например, более яркие области или частицы), проходя через исследуемые точки, вызывают соответствующие серии импульсов. Если появление импульсов в первом и втором каналах независимо и носит случайный характер, то схема будет регистрировать только случайные совпадения. Среднее число случайных совпадений, регистрируемых в единицу времени, равно

$$N = 2\tau n_1 n_2 \quad (1)$$

Здесь N — число регистрируемых случайных совпадений, n_1, n_2 — среднее число импульсов в единицу времени в каналах, τ — разрешающее время счетчика совпадений.

Пусть исследуемое течение газа направлено вдоль оси x . Рассмотрим элементарные площадки, нормальные к потоку, расположенные в точках 1 и 2, смещенных одна относительно другой на некоторое расстояние L вдоль оси x . Пусть также число импульсов, регистрируемых первым и вторым каналами в единицу времени, равно числу неоднородностей, проходящих через соответствующие элементарные площадки.

Число частиц, прошедших через первую площадку и проходящих после этого через вторую площадку в единицу времени, может быть определено следующим образом:

$$N_{12} = n_1 \int_{F_2} p(y, z) dF \quad (2)$$

Здесь n_1 — число неоднородностей, проходящих через первую площадку в единицу времени; $p(y, z)$ — плотность вероятности прохождения неоднородностей, прошедших через первую площадку и проходящих через точки плоскости второй площадки; F_2 — площадь второй площадки.

Если неоднородности, прошедшие через первую площадку проходят и через вторую, то между импульсами, вызываемыми их прохождением в первом и втором каналах, имеет место временной сдвиг, равный времени пролета.

Таким образом, если хотя бы часть неоднородностей, прошедших через первую площадку, проходит и через вторую, то при задержке импульсов первого канала на величину времени пролета, будут иметь место совпадения, вызываемые прохождением одной и той же неоднородности.

Число совпадений в единицу времени при задержке t в первом канале равно

$$(N_{12})_t = N_{12} \int_{t-\tau}^{t+\tau} p_x(t) dt \quad (3)$$

Здесь τ — разрешающее время счетчика совпадений, $p(t)$ — плотность вероятности

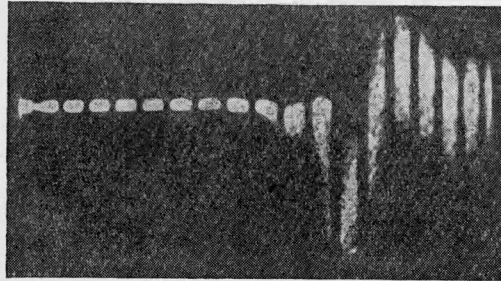
Фиг. 5. Схема измерений методом совпадений

времени пролета базы L вдоль оси x .

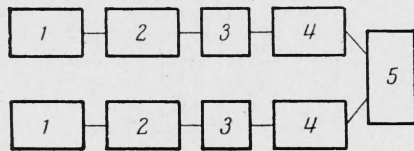
Система N_{12} — N совместна, т. е. в один и тот же момент времени через вторую площадку может пройти как «истинная» неоднородность (т. е. прошедшая предварительно через первую площадку), так и случайная, и при этом они будут зарегистрированы как одна, поэтому суммарное число совпадений в системе при данной величине задержки в первом канале будет равно

$$N_t = N + (N_{12})_t - N_t \quad (4)$$

Здесь N_t — число случайных совпадений, происходящих одновременно с истинными.



Фиг. 4. Типичный результат записи при фотоэлектрической регистрации времен полета



Считая вероятности появления сигнала и шума независимыми, находим

$$N_t = 2n_1 n_2 \tau \int_{F_2} p(y, z) dF \int_{t-\tau}^{t+\tau} p_x(t) dt$$

Используя (1) — (4), найдем отношение сигнала к шуму, т. е. отношение полного числа совпадений при данном времени задержки в первом канале к числу случайных совпадений

$$\frac{N_t}{N} = 1 + \frac{1 - 2n_2 \tau}{2n_2 \tau} \int_{F_2} p(y, z) dF \int_{t-\tau}^{t+\tau} p_x(t) dt \quad (5)$$

Положив для простоты $n_1 = n_2 = n$ и считая положение площадок и режим течения неизменным, можно написать

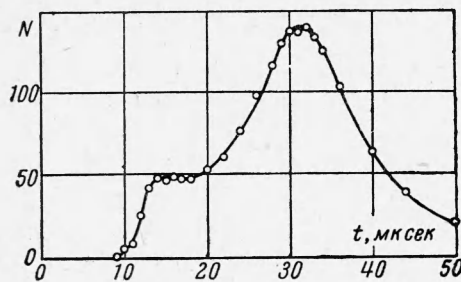
$$\frac{N_t}{N} = 1 + \text{const } t - \frac{1 - 2n\tau}{2n\tau} \quad (6)$$

Из (6) видно, что если величина $n\tau$ достаточно мала, отношение сигнала к шуму может быть как угодно большим. С другой стороны, если величина $n\tau$ приближается к 0.5, отношение сигнала к шуму приближается к 1, т. е. сигнал неотличим от шума.

Это и понятно. При $n\tau = 0.5$ внутри любого интервала времени 2τ , разрешаемого счетчиком, оказывается в среднем по импульсу и счетчик должен считать беспрерывно независимо от того, есть истинный сигнал или нет.

Регулируя делителями 3 (фиг. 5) уровни сигналов, идущих по каналам, можно добиться того, что система будет считать только наиболее резко выраженные неоднородности, и таким образом величина n окажется достаточно малой. Разрешающее время счетчиков составляет обычно $\tau = 10^{-6} \div 10^{-8}$ сек; таким образом n может быть достаточно велико.

Необходимо отметить, что сказанное выше справедливо для статистического



Фиг. 6. Результат измерений времен пролета при помощи метода совпадений

распределения неоднородностей. Если в распределении неоднородностей имеются какие-либо периодичности, то для получения однозначных решений указанным методом необходимо, чтобы линейный масштаб этих периодичностей был больше используемой базы измерения. Это требование равносильно требованию отсутствия соответствующих гармоник в результатах измерений.

Меняя положение второй площадки относительно первой и измеряя зависимость плотности счета от времени задержки, можно найти дифференциальную функцию вероятности пролета неоднородностей, что полностью определяет статистическое положение вектора скорости потока в первой точке. Этот метод удобен для изучения характеристик турбулентности и может быть применен для исследования как плазмы, так и холодного газа. Неоднородности, используемые для измерений, могут иметь самую различную природу (более горячие сгустки плазмы, капли горящего топлива, искусственно вводимые твердые или жидкие частицы и т. д.). Кроме того, данный метод может быть использован для изучения структуры потока. Так на фиг. 6 приведены результаты измерений времени пролета неоднородностей на базе 12 мм в сложном течении, включающем сравнительно крупные частицы. Как видно из фиг. 6, время пролета в данном случае имеет большой разброс и группируется около двух значений $t = 14$ и 31 мксек. Первое соответствует частицам, движущимся со средней скоростью 850 м/сек, а второе движению чисто газовых неоднородностей со скоростью 390 м/сек.

При этих измерениях использовался фотоэлектрический датчик, собранный на умножителях типа ФЭУ-29.

Для выделения базы измерения использовалась оптическая система. Были применены линии задержки и счетчик от установки для регистрации совпадений и антисовпадений — ССА.

Поступила 27 XI 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Трохан А. М. Измерение скорости газовых потоков кинематическими способами. ПМТФ, 1962, № 2, стр. 112—121.