

СПОСОБ ПРОВЕДЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В. Н. Туркин, А. С. Шубин

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

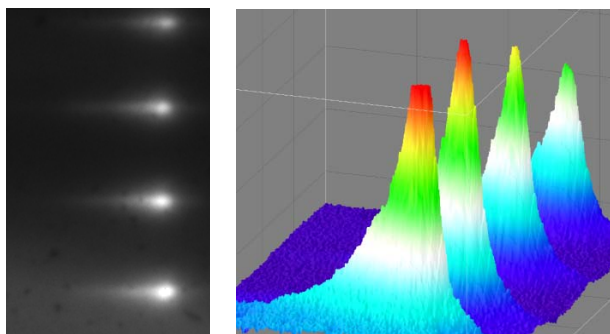
Одной из задач при исследовании быстропротекающих газодинамических процессов является регистрация разновременности выхода детонационной волны на внутреннюю поверхность детонационного распределителя. Одним из способов решения данной задачи является регистрация с помощью фотохронографа с зеркальной разверткой с записью информации на фотопленку или цифровой регистратор матричного типа. При этом регистрируют излучение от оптических датчиков, представляющие собой отрезки оптического волокна, одни концы которых располагают на внутренней поверхности детонационного распределителя, вторые концы выводят на плоскую поверхность в виде планки в несколько столбцов и строк, которую располагают перпендикулярно объективу фотокамеры. Свечение в световодах возникает в результате сжатия воздуха ударной волной перед их торцом.

В связи с переходом от пленки к цифровому регистратору и увеличением размера чувствительной области цифрового регистратора в вертикальном и горизонтальном направлении возникло ряд актуальных задач, связанных с повышением точности проведения измерений.

Основными источниками погрешности при проведении измерений являются: погрешность определения координат изображений оптических датчиков; погрешность определения начала процесса; неравномерность скорости перемещения изображения по поверхности цифрового регистратора; дисторсионные искажения фокона.

Одной из погрешностей проведения измерений является погрешность определения координат изображений оптических датчиков. При обработке фотопленки координаты изображений оптических датчиков определяют двумя способами: либо по краю, либо по центру почернения, с ошибкой равной половине величины диаметра датчика $\pm 0,5 \times d$, что может составлять несколько десятков нс.

При регистрации сигналов с оптических датчиков, свет, возникающий в процессе сжатия среды ударной волной, передается с помощью оптической системы фотохронографа на ПЗС или КМОП-матрицу. Структура сигнала имеет вид, представленный на рис. 1. В начальный момент времени происходит плавное, а затем резкое нарастание яркости излучения с четко выраженным максимумом, по достижению которого происходит плавный спад яркости.

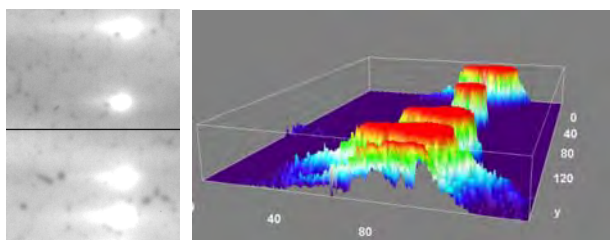


Направление развертки изображения

Рис. 1. Форма сигнала с оптических датчиков

Обработка сигналов с оптических датчиков, зарегистрированных на ПЗС или КМОП-матрицу, имеет ряд особенностей. При определении координаты изображения оптического датчика по началу свечения, начальная координата будет определяться чувствительностью используемого регистратора. Соответственно регистрация одного и того же процесса на регистраторы разной чувствительности будет приводить к существенному разбросу полученных данных, ошибкам.

В ряде случаев сигналы с оптических датчиков имеют слишком яркое свечение, что приводит к частичной засветке цифрового фоторегистратора. Вместо четко выраженного максимума образуется площадка, которая может достигать более десяти пикселей (рис. 2). Вследствие того, что на одном кадре могут присутствовать как изображения датчиков с пересвеченным, так и с четко выраженным максимумом, обработка их единым алгоритмом по максимуму свечения приведет к существенному разбросу измеренных интервалов.



Направление развертки изображения

Рис. 2. Потеря информации при пересвете оптических датчиков

В связи с тем, что резкое нарастание яркости происходит в течение нескольких десятков нс, был предложен способ измерения координат оптических датчиков градиентным методом, который заключается в определении координаты оптических датчиков в том месте, где происходит максимально быстрое нарастание фронта. Происходит вычитание из значения кода яркости Z , имеющего пиксел X_i , значения, имеющего пиксел с координатой X_{i-1} . Координата оптического датчика принимается в том месте, где данная разность имеет максимальное значение.

$$Z_X = Z_{X_i} - Z_{X_{i-1}} = \max. \quad (1)$$

Отмечено, что в проведенной серии опытов при обработке изображений сигналов полученных с одновременно сработавшей группы оптических датчиков, интервалы времени, имеющие наименьшее среднеквадратическое отклонение определены градиентным способом.

Вторым источником погрешности при проведении измерений является ошибка определения начальной координаты отметки, формируемой в момент инициирования процесса. Данная отметка реализуется с помощью искрового разрядника, в результате подачи электрического тока на провололку между двумя контактами происходит ее разрыв и возникает свечение (рис. 3). Недостатком способа явля-

ется то, что искра имеет пологий фронт разгорания (рис. 4), и регистрация начального момента свечения искры определяется чувствительностью фотопленки, ПЗС или КМОП-матрицы, величиной открытия диафрагмы. Таким образом, при дублированной регистрации разновременности выхода детонационной волны на внутреннюю поверхность детонационного распределителя на фоторегистраторы разной чувствительности, начало свечения искры относительно сработавших оптических датчиков будет зарегистрировано в разный момент времени, на фотопленке или матрице с большей чувствительностью раньше, чем на фотопленке или матрице с меньшей чувствительностью. Возникающая ошибка в измерениях может достигать более 100 нс.

Третьим источником погрешности проведения измерений является неравномерность скорости перемещения изображения по поверхности цифрового регистратора, что обусловлено отличием в радиусах на разных участках поверхности СФР, где расположена фотопленка или цифровой регистратор. Это приводит к увеличению погрешности измерений до 0,4 мкс. Данный недостаток может быть компенсирован путем нанесения на фотопленку или цифровой регистратор матричного типа с заданной частотой одного ряда меток времени.

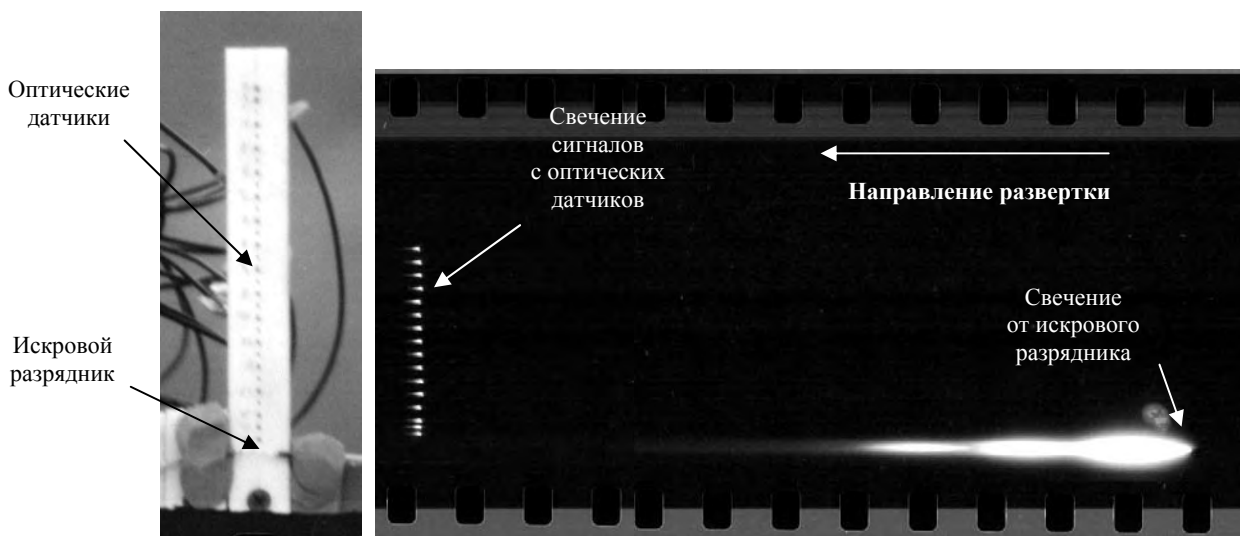


Рис. 3. Расположение искрового разрядника на планке и пример полученного изображения

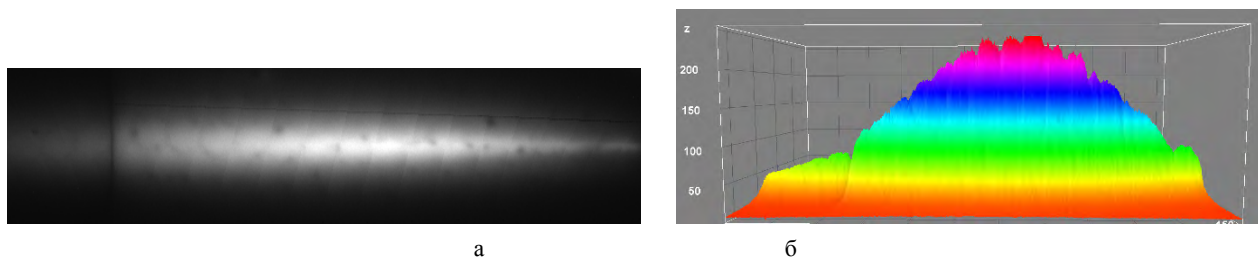


Рис. 4. Фронт яркости искры: а – изображения искры; б – профиль яркости искры

При использовании цифрового регистратора, имеющего увеличенный размер чувствительной области в вертикальном и горизонтальном направлении и сложную многоуровневую структуру, включающую в себя несколько склеенных по боковой поверхности фоконов, оптически контактно соединенные с ВОП и КМОП-матрицами, может появляться дополнительное отличие в радиусах между верхней и нижней частью цифрового регистратора. Данное отличие в радиусах приводит к отличию в скорости перемещения изображения вдоль верхней и нижней части регистратора, что приводит к ошибке при проведении измерений, величина которой может достигать более 100 нс. Один ряд меток времени, позволяет компенсировать неравномерность скорости перемещения изображения по поверхности только вдоль одной, верхней или нижней, части изображения.

Скорость перемещения изображения по чувствительной поверхности фотоприемника определяется формулой:

$$V \left[\frac{\text{мм}}{\text{мкс}} \right] = 2 \frac{2\pi\nu v [\text{Гц}] R [\text{мм}]}{1 \cdot 10^6}. \quad (2)$$

Отличие в результатах измерений при отличии радиуса в расположения верхней и нижней части фотоприемника на 1 мм представлено в таблице.

Зависимость скорости перемещения от радиуса

	Радиус R270	Радиус R271
V [мм/мкс]	2,543	2,553
V [мм/мкс]	158,963	159,551
$t_{\text{пикс}}$ [мкс]	0,00629	0,00627
t_{10000} [мкс]	62,908	62,676
Δt [мкс]	0,232	

Как видно из таблицы отличие радиуса на 1 мм приводит к отличию в измеренных интервалах более чем на 200 нс.

Для повышения точности проведения измерений предложена конструкция устройства ввода излучения, которая позволяет наносить на поверхность цифрового фоторегистратора два ряда меток времени и световую отметку в момент инициирования исследуемого процесса (рис. 5). Повышение точности достигается за счет того, что устройство ввода оптического излучения для нанесения меток времени в скоростной фотохронографический регистратор (СФР) позволяет наносить метки времени вдоль двух горизонтальных осей – по верхней и нижней части поверхности фотоприемника. Это позволяет компенсировать отличие в скорости перемещение изображения, которое обусловлено отличием в радиусах дуги окружности, на которой расположен фотоприемник. Использование лазерного генератора для получения световой отметки, позволяет получать в момент прихода подрывного электрического импульса вспышку длительностью несколько десятков нс, имеющую размер всего несколько пикселей.

Устройство ввода оптического излучения для нанесения меток времени в СФР 6, состоит из трех оптических волокон, лазерного генератора с двумя источниками светового излучения, которые закреплены в держателе оптического волокна, и червячной пары.

Входные торцы оптического волокна оптически связаны с лазерным генератором. Противоположные концы оптических волокон закреплены в держателе оптического волокна. Держатель оптического волокна расположен в месте построения промежуточного изображения входным длиннофокусным объективом СФР, на одной оптической оси с входным длиннофокусным объективом СФР, выходным короткофокусным объективом СФР, с рабочей плоскостью подвижного зеркала 3 и фотоприемника 6 и своей рабочей плоскостью. Держатель оптического волокна перпендикулярен данной оптической оси. Держатель оптического волокна соединен с червячной парой, обеспечивающей его перемещение вдоль оптической оси для фокусировки изображения торцов волокон на поверхности фотоприемника.

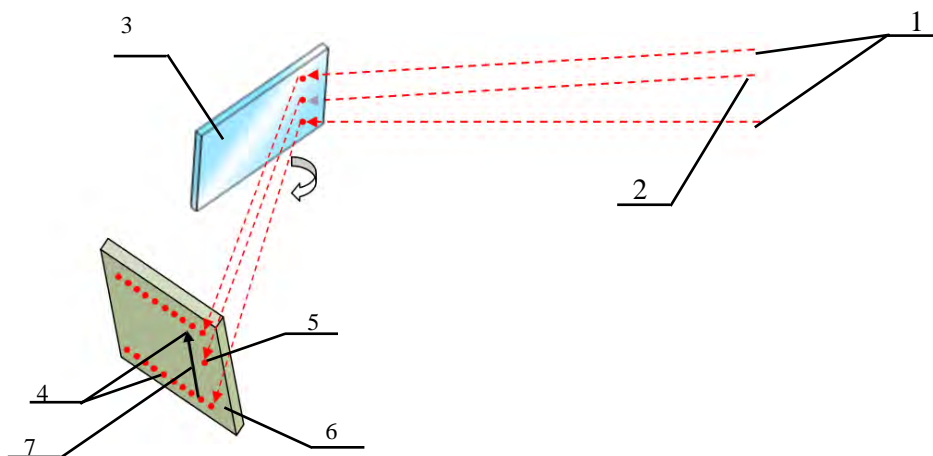


Рис. 5. Схема устройства ввода оптического излучения: 1 – пучки с метками времени; 2 – пучок со световой отметкой; 3 – вращающееся зеркало; 4 – изображение меток времени; 5 – изображение световой отметки; 6 – цифровой фоторегистратор (фотоприемник); 7 – изображение исследуемого объекта

Способ проведения измерений заключается в следующем:

- с помощью оптической системы СФР делают два кадра планки со световодами: статический, при неподвижном зеркале, и динамический, при вращающемся с заданной скоростью зеркале,

- на статическом кадре регистрируют планку, содержащую матрицу с расположенными в ней световодами, а также регистрируют расположение относительно планки нулевого световода, по которому в момент начала исследуемого процесса передают световой импульс.

- на динамическом кадре фиксируют световую отметку изображения, сформированного в момент начала процесса с помощью лазерного генератора, сигналы срабатывания оптических датчиков, и два ряда меток времени в верхней и нижней части кадра.

На динамическом кадре измеряют расстояние от изображения световой отметки до изображения сигналов с оптических датчиков и делят на скорость развертки изображения в данный момент времени, которую определяют по меткам времени. При этом для датчиков, зарегистрированных в верхней части изображения используют скорость, определенную по верхним меткам времени, а для датчиков, зарегистрированных в нижней части изображения, используют скорость, определенную по нижним меткам времени.

Таким образом, применение устройства ввода оптического излучения при проведении многоканальных измерений интервалов времени с помощью цифровой фотографической системы повышает их точность.