

Кривая 3 построена в предположении равного содержания в ПВ карбида бора, т. е. зависимость теплоты взрыва системы $\text{тэн} + \text{o-Б}$ соответствовала бы кривой 3, если бы в ПВ этой системы содержание карбида бора было равным содержанию последнего в ПВ системы $\text{тэн} + \text{В}$. Ордината, заключенная между кривыми 2—3, соответствует потерям энергии в системе $\text{тэн} + \text{o-Б}$, обусловленным протеканием энергетически невыгодной реакции образования карбида бора. Различие кривых 3 и 4 вызвано тем, что введение *o*-барена в состав связано с увеличением количества водорода и углерода в исходной смеси по сравнению с системой $\text{тэн} + \text{В}$.

Поступила в редакцию
9/XI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Б. Ратнер, Ю. Б. Харитон. ЖФХ, 1946, 20, 221.
2. А. Ф. Беляев, Р. Х. Курбангалина. Сб. «Физика взрыва», № 3, 1955.
3. L. Brewer, A. Searcy. JACS, 1951, 73, 5308.
4. M. A. Cook, A. S. Filler, R. T. Keyes. J. Phys. Chem., 1957, 61, 2, 189.
5. А. Я. Апин, Ю. А. Лебедев, О. И. Нефедова. ЖФХ, 1958, 32, 4, 819.
6. Б. Я. Светлов. Сб. «Взрывное дело», № 52/9. М., Госгортехиздат, 1963.
7. Л. Н. Стесик. ФГВ, 1971, 7, 1.
8. А. Я. Апин, Н. Ф. Велина, Ю. А. Лебедев. ПМТФ, 1962, 5.
9. Б. М. Михайлов. Химия бороводородов. М., «Наука», 1967.
10. В. И. Пепекин, Ю. Н. Матюшин и др. Изв. АН СССР, сер. хим., 1971, 2, 268.

УДК 533.6.011

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЯХ

В. К. Баев, Г. В. Климчик, В. А. Ясаков

(Новосибирск)

Важнейшим преимуществом шлирен-метода исследования газовых потоков перед другими методами является возможность получить большой объем информации за короткое время, а также то, что процесс измерения не вносит возмущения в исследуемую систему.

Используемый в работе метод, известный под названием метода ножа и щели, находит широкое применение для качественных исследований газовых течений, изучения геометрических характеристик потоков. Для количественных же измерений фотометрические методы не получили большого распространения, так как при обработке первичной информации, необходимой для получения конечного результата, возникает большая погрешность.

Цель настоящей работы — доработка метода ножа и щели, чтобы результаты, полученные этим методом, давали не только качественную характеристику поведения концентрации в потоке, но и количественно соответствовали опытным данным, полученным другими экспериментальными методами.

В качестве примера проведено измерение концентрации при смешении турбулентной осесимметричной струи водорода с воздухом.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Световой луч, входящий в осесимметричную оптическую неоднородность перпендикулярно оси, выходит из нее, отклонившись на угол δ от первоначального направления. Если градиенты показателя преломления в неоднородности невелики, т. е. во всей рассматриваемой области угол $\delta \ll 1$, то показатель преломления n и угол отклонения δ связаны соотношением [1]

$$n(r) - n_0 = \int_{r_0}^r \frac{\delta(t) dt}{\sqrt{t^2 - r^2}}, \quad (1)$$

где r_0 — радиус неоднородности; n_0 — показатель преломления при $r \geq r_0$.

Метод вычисления этого интеграла хорошо известен [2] и дает для него выражение в виде конечного ряда

$$1 - \frac{n(\bar{r}_i)}{n_0} = \sum_{\mu=1}^{2N-1} \gamma_{i\mu} \delta(\bar{r}_\mu), \quad (2)$$

где

$$\bar{r}_i = \frac{r_i}{r_0} = \frac{i}{N}; \quad \bar{r}_\mu = \frac{r_\mu}{r_0} = \frac{\mu}{2N};$$

$\gamma_{i\mu}$ — постоянные коэффициенты, вычисленные и затабулированные для различных значений N (см. [2], [3]); $i=0, 1, \dots, N-1$; $\mu=0, 1, \dots, 2N-1$.

Локальная освещенность изображения неоднородности, которое дает шлирен-система, связана с углом отклонения световых лучей соотношением [1]

$$\frac{I - I_0}{I_0} = \frac{f \cdot \tan \delta}{a}, \quad (3)$$

где f — фокусное расстояние основной линзы шлирен-системы; a — ширина открытой части изображения источника света в плоскости оптического ножа (ширина открытой части щели). Освещенность экрана I можно определить, измерив почернение фотоматериала S , по формуле

$$\frac{I}{I_0} = 10 \frac{S - S_0}{\gamma}, \quad (4)$$

где γ — коэффициент контрастности фотоматериала. Для малых углов отклонения ($\delta \ll 1$) из формул (3) и (4) получаем зависимость между углом отклонения δ и почернением фотоматериала S .

$$\delta = \frac{a}{f} \left(10 \frac{S - S_0}{\gamma} - 1 \right). \quad (5)$$

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для получения изображения неоднородности используется прибор Теплера. Одним из важнейших параметров этого прибора является ширина открытой части изображения источника света в плоскости оптического ножа (ширина открытой части щели). При ее определении следует учитывать, что чувствительность прибора Теплера обратно пропорциональна ширине открытой части щели

$$\frac{dS}{d\delta} \sim \frac{\gamma \delta}{a} \quad (6)$$

и что все углы отклонения световых лучей в неоднородности должны измеряться прибором, т. е. находиться внутри интервала

$$-\frac{a}{f} \div \frac{h-a}{f},$$

где h — ширина изображения источника света в плоскости оптического ножа. Следовательно, значение ширины открытой части щели должно удовлетворять неравенству

$$f \cdot \delta_{\max} \leq a \leq h - f \cdot \delta_{\max}. \quad (7)$$

В силу симметрии задачи достаточно измерять только положительные углы отклонения. Это дает возможность увеличить чувствительность прибора Теплера при одновременном увеличении диапазона измерения, что достигается уменьшением a . Но ширину открытой части щели нельзя сделать сколь угодно малой, так как при очень малых a большую погрешность вносят эффекты, обусловленные волновой природой света.

При выборе фотоматериала для фотографирования неоднородности следует учитывать, что в результате эксперимента определяются осредненные по времени характеристики турбулентного потока, т. е. выдержка должна быть достаточно большой (больше 0,5 сек [4]) и что при заданной величине открытой части щели чувствительность прибора прямо пропорциональна коэффициенту контрастности фотоматериала. В настоящей работе использовалась фотопленка дубль-2А чувствительностью 0,5 ед. ГОСТа с коэффициентом контрастности $\gamma \approx 1,8$.

Для определения выдержки, при которой следует производить фотографирование неоднородности, используется характеристика пленки, т. е. зависимость почернения S от $\lg \epsilon$ ($\epsilon = I \cdot \tau$). Если при построении характеристики освещенность остается равной I_0 , а изменение экспозиции ϵ достигается путем изменения времени выдержки τ , то выдержка τ_1 , которой на характеристике соответствует начало линейного участка, и будет искомой величиной (рис. 1).

Формула (5) дает лишь качественную характеристику зависимости почернения от угла отклонения [5]. Для количественных же измерений необходимо установить истинную связь между почернением S и углом отклонения δ . Для выяснения этой связи измеряется зависимость

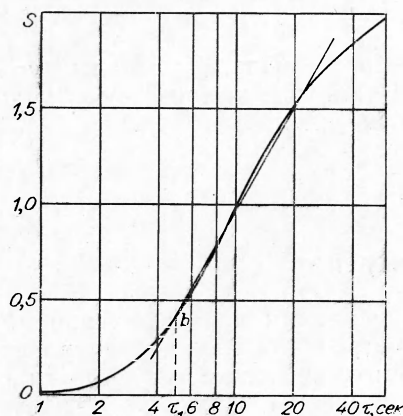


Рис. 1. Характеристика фотопленки.

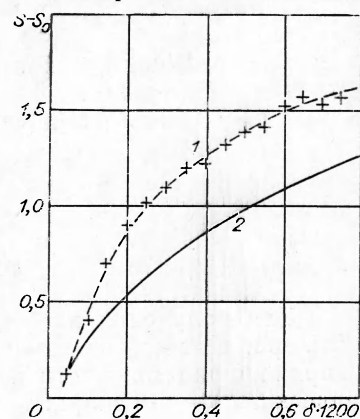


Рис. 2. Зависимость почернения от угла отклонения.

1 — эксперимент; 2 — расчет по формуле (5) при $\gamma = 1,8$; $f = 1200$ мм; $a = 0,2$ мм.

почернения фотоматериала от ширины открытой части щели (при этом выдержка остается той же, что и при основных измерениях). На самом деле, пусть ширина открытой части щели, при которой предполагается производить измерение углов отклонения, равна a и на пути светового пучка нет неоднородности. Если теперь увеличить ее до a_1 , то освещенность экрана станет такой же, как если бы при ширине a на пути светового пучка поместили оптическую неоднородность, отклоняющую лучи на угол $\delta = \frac{a_1 - a}{f}$.

На рис. 2 приведены как экспериментально измеренная зависимость почернения от угла отклонения, так и рассчитанная по формуле (5). Из сравнения этих кривых видно, что использование формулы (5) вместо истинной зависимости дает ошибку в определении угла $\sim 100\%$. В дальнейшем при получении количественных данных использовалась экспериментальная кривая, приведенная на рис. 2.

Таким образом, для измерения показателя преломления рассмотренным методом нужно:

- 1) получить шпирен-фотографию струи;
- 2) отфотометрировать ее в нужных сечениях;
- 3) на кривой почернения определить границу и ось струи; часть кривой, соответствующую положительным углам отклонения, разбить на $2N$ равных частей и определить почернение $(S - S_0)_\mu$ (S_0 — почернение фона) во всех точках;
- 4) с помощью тарировочной кривой (см. рис. 2) определить углы отклонения δ_μ в этих точках;
- 5) по формуле (2) вычислить показатель преломления.

Зная распределение показателя преломления n , можно определить объемную концентрацию k из соотношения

$$k = \frac{1 - \frac{n - 1}{n_0 - 1} \left(\frac{T}{T_0} \right)}{1 - \frac{n_1 - 1}{n_0 - 1} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)}, \quad (8)$$

где n_0 — показатель преломления невозмущенного потока; n_1 — показатель преломления струи в начальном сечении; T_0 — температура потока; T_1 — начальная температура струи.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

По описанной выше методике было проведено измерение концентрации в струе водорода, вытекающей в неподвижный воздух. Скорость истечения струи водорода равнялась 830 м/сек , а температуры торможения водорода и воздуха были равны 290° К . Фотографирование неоднородности производилось при следующих значениях характерных величин: ширина осветительной щели $h = 1 \text{ мм}$; ширина открытой части щели $a = 0,2 \text{ мм}$; фокусное расстояние $f = 1200 \text{ мм}$; выдержка $\tau = 5 \text{ сек}$. При вычислении концентрации предполагалось, что температура во всей области течения постоянна.

Ошибка в определении концентрации обусловлена в основном неточностью измерения угла отклонения

$$\frac{\Delta k}{k} \sim \frac{\Delta \delta}{\delta}.$$

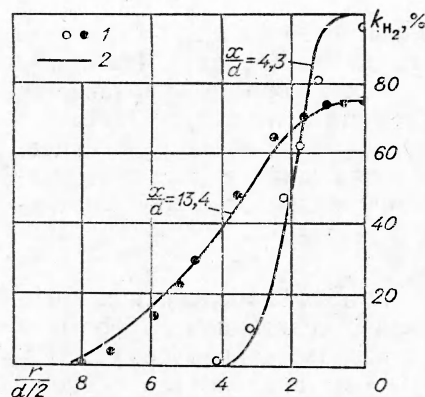


Рис. 3. Профили концентрации. x — продольная координата; r — поперечная координата; d — диаметр сопла. 1 — газовый анализ; 2 — оптический метод.

Наибольшую погрешность в измерение угла отклонения вносит неточность определения ширины открытой части щели a и ошибка в определении поперечения S

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} \sim \frac{\Delta S}{\left(\frac{dS}{d\delta}\right) \cdot \delta} + \frac{\Delta a}{a}.$$

Приведенные результаты получены при $\Delta S \approx 0,01$; $\frac{\Delta a}{a} \approx 0,05$; $\frac{dS}{d\delta} \cdot \delta \approx 0,56$,

что дает для относительной ошибки измерения концентрации величину $\sim 7\%$.

На рис. 3 профили концентрации, полученные по рассмотренной методике, сравниваются с результатами газового анализа. Из рисунка видно, что между этими данными наблюдается удовлетворительное совпадение.

Поступила в редакцию
1/XII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Физические измерения в газовой динамике и при горении. М., ИЛ, 1957.
2. Л. А. Васильев. Теневые методы. М., «Наука», 1968.
3. В. А. Емельянов, Г. П. Жаврид. ИФЖ, 1962, 4.
4. Н. А. Замятина, О. И. Навознов, А. А. Павельев. ФГВ, 1967, 3, 3, 455.
5. В. W. Hannay, R. J. Dale. International Congress on Instrumentation in Aerospace simulation Facilities, ICIASF 69, Record, 1969, pp. 223—228.