

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ
ГАЗА ЗА ФРОНТОМ ДЕТОНАЦИИ

Р. И. Солоухин, Т. А. Шарова

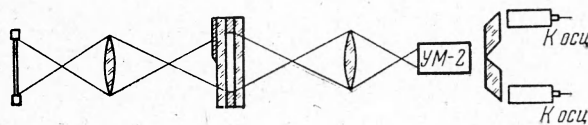
(Новосибирск)

Приводятся данные о распределении свечения и температуры газа за фронтом детонации в ацетилено-кислородных смесях. Отмечено существование неравновесной концентрации C_2 в узкой области, примыкающей к фронту волны. Измерение температуры газа производилось обобщенным методом обращения спектральных линий [1]. В пределах разрешающей способности во времени (менее 10^{-7} сек) температура за фронтом детонации соответствует равновесному расчету для детонации Чепмена — Жуге.

Спектроскопические методы измерения высокой температуры в газах получили дальнейшее развитие при изучении состояния газа за фронтом ударных волн [1-3]. Одно из преимуществ оптических методов состоит в возможности получения высокой разрешающей способности измерений во времени, однако для сравнительно невысоких температур (3—6 тыс. °К) в этом отношении имеются некоторые ограничения. Дело в том, что при измерениях в указанном диапазоне температур собственное излучение исследуемого газа невелико, поэтому приходится использовать спектральные линии излучения примесей с низким потенциалом возбуждения (Na, Ca, Ba и т. п.). Время, необходимое для установления теплового равновесия между частицами примесей и нагретым газом, может составлять заметную величину. Например, при измерении за фронтом ударных волн в воздухе при $T \approx 4000^\circ \text{K}$ длительность установления равновесного испускания в области D-линий натрия оказалась равной нескольким десяткам мксек [4].

При изучении состояния газа за фронтом детонации в ацетилено-кислородных смесях при значительной испускательной способности газа в линиях углеродной серии оказалось возможным производить измерение температуры с использованием спектральных линий собственного свечения газа. В этом случае можно получить высокую разрешающую способность метода во времени, что позволяет измерить температуру вблизи детонационного фронта.

1. Описание установки и способов измерений. Детонация смеси производилась в длинной трубке из оргстекла с прямоугольным сечением $25 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$. Длина участка перехода горения в детонацию при поджигании смеси конденсированной искрой составляла менее одной десятой расстояния от искры до места наблюдения. Схема измерения температуры показана на фиг. 1.



Фиг. 1

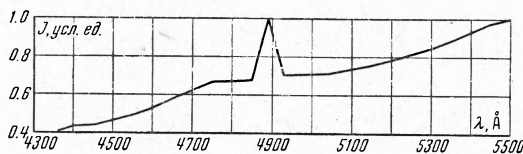
Канал трубки ограничен щелью, перпендикулярной ее оси и разделенной по высоте на две половинки. Изображение внутреннего объема трубки фокусируется на входную щель монохроматора УМ-2.

В одну из половинок щели фокусируется изображение светящейся поверхности источника подсветки, а через другую регистрируется собственное свечение газа.

Световые сигналы, проходящие через щель, отдельно фотометрируются на выходе монохроматора при помощи двух фотоумножителей ФЭУ-19. Взаимное перекрытие световых потоков составляет при этом менее 2%.

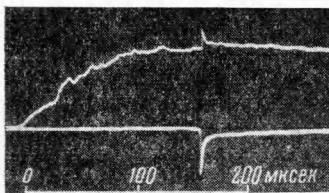
Запись сигналов производится двухлучевым импульсным осциллографом типа ОК-17М.

В качестве источника подсветки удобно использовать криптоно-ксеноновую импульсную лампу, например, типа ИФК-50. На фиг. 2 показан спектр испускания такой лампы, который состоит из континуума с некоторым усилением в области $\lambda = 4890 \text{ \AA}$. Яркостная температура такой лампы



Фиг. 2

может составлять более 5000° K . Ее среднюю величину в течение импульса свечения можно задавать при помощи изменения напряжения разряда. Для получения достаточно однородного свечения лампы в течение заданного промежутка времени в цепь ее разряда включается искусственная линия (8 ячеек по 90 мкф и 8 мкги). Применяя такую схему разряда, можно получить импульс свечения длительностью около 500 мксек со временем нарастания менее 100 мксек. Момент зажигания импульсной лампы синхронизируется со временем прихода детонационной волны к месту наблюдения при помощи схемы задержки.



Фиг. 3

Тарировка величины сигнала подсветки производится по яркостной температуре эталонного источника света (ленточной лампы СИ8-200). Ленточная лампа устанавливается на место импульсной лампы, а яркостная температура T_0 ее изображения внутри канала

детонационной трубки определяется при помощи оптического пирометра типа Siemens. Яркостная температура источника подсветки T_0 определяется по отношению величины сигнала подсветки к сигналу от эталонной лампы

$$T_0 = T_0 \left[1 - \frac{\lambda T_0}{C_2} \ln \frac{J_0}{J_c} \right]^{-1}$$

На фиг. 3 показана типичная осциллограмма процесса. Нижний луч записывает собственное свечение газа, а сигнал, записываемый верхним лучом, определяется суммой световых потоков подсветки и свечения объема просвечиваемого газа. Температура газа определяется по формуле

$$T = T_0 \left[1 - \frac{\lambda T_0}{C_2} \ln \frac{J_{\Lambda+D} - J_{\Lambda}}{\alpha J_D} \right]^{-1}$$

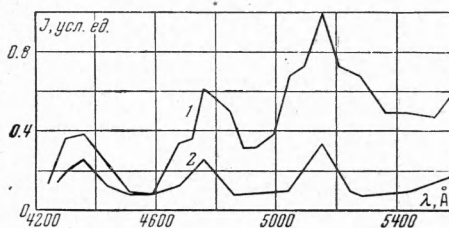
где α является коэффициентом приведения чувствительности первого канала регистрации к чувствительности второго.

Максимальную температуру газа за детонационной волной можно определить также путем непосредственного наблюдения обращения, т. е. исчезновения импульса свечения детонации при соответствующей величине сигнала подсветки $J_{\Lambda+D} = J_{\Lambda}$.

Хорошая повторяемость процесса позволила провести такие измерения, и результаты в пределах ошибок измерений совпали с измерениями обобщенным методом обращения.

Разрешение во времени определяется прежде всего шириной щели наблюдения на детонационной трубке. Ее ограничение по ширине производилось путем изменения ширины входной щели монохроматора, на которую фокусируется щель на камере.

При измерениях в равнообъемной смеси можно уменьшить щель до 0,05 мм, что соответствует разрешающей способности около $2 \cdot 10^{-8}$ сек. Однако в этом случае разрешение во времени ограничивается уже искажениями при электрическом усилении сигнала. Поэтому нижней границей разрешающей способности в описываемых опытах следует считать величину около $0,5 \cdot 10^{-7}$ сек.



Фиг. 4

2. Спектр свечения детонации. Сравнение спектров испускания различных газов и смесей за фронтом ударных волн со спектрами, получаемыми в электрической дуге, было проведено в работе [5]. Там же было замечено, что линия C_2 в углеводородных смесях высвечивается в основном возле ударного фронта, в то время как свечение гидроксила, например, существует на значительном расстоянии за фронтом волны.

В описываемых опытах хорошая повторяемость детонационного процесса позволила получить количественные данные о спектре испускания газа за фронтом детонации в ацетилено-кислородных смесях путем фотометрирования импульса свечения при различных длинах волн в видимой области спектра.

Измерения производились через интервалы в 30–80 Å при ширине выходной щели монохроматора 0,1 мм и дисперсии аппарата от 50 до 120 Å/мм. Результаты измерений для стехиометрической и равнообъемной смесей показаны на фиг. 4. На сплошном фоне неразрешенных полос выделяются максимумы серии Свана ($\lambda = 4737 \text{ Å}$, $\lambda = 5165 \text{ Å}$ и др.). Спектр испускания слабо зависит от начального давления смеси.

При измерении температуры газа был использован участок $\lambda = 5150 \text{ Å}$, наиболее удобный с точки зрения спектральной чувствительности фотоумножителей.

В этом интервале спектра можно производить измерения при небольших напряжениях на ФЭУ (750–850 в), что существенно уменьшает уровень шумов фотоумножителя.

3. Измерение температуры газа. Измерение температуры газа за фронтом детонации производилось при пониженных начальных давлениях смеси (от 30 до 200 мм рт. ст.).

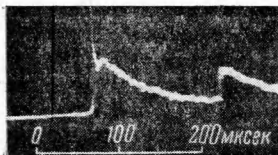
Для таких давлений по существующим оценкам ширина зоны химического реагирования может составлять десятые доли мм.

Сигнал собственного свечения газа за фронтом волны имеет резкий максимум, за которым следует быстрый спад в течение нескольких мксек.

Далее наблюдается медленный спад, соответствующий по времени падению температуры сгоревшего газа в волне разрежения за фронтом детонации.

Для иллюстрации такой картины распределения свечения газа на фиг. 5 показана осциллограмма, полученная при повышенном напряжении на фотоумножителе, когда световой поток в начальный момент превышает порог запираания фотоумножителя.

Падение температуры в равновесном потоке газа за детонационной волной с удалением от фронта детонации на расстояние x приближенно



Фиг. 5

определяется соотношением [6].

$$\frac{T}{T_{\Phi}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{X-x}{X}}$$

где X — путь, пройденный волной от места инициирования. Для небольших x уменьшение температуры газа

$$\Delta T \approx \left(\frac{\gamma-1}{2\gamma}\right) \frac{x}{X}$$

что для нашего случая составляет около 0.1% при $x = 5$ мм.

Таблица 1

Максимальная температура детонации T_D К° при различных значениях ширины щели α и давления p в мм. рт. ст.

$C_2H_2 + O_2$

α \ p_0	0.04	0.06	0.08	0.10	0.14	0.18	0.20	0.22	0.26	0.30
25							3580			
40							3550			
50	4670	4340	4380	3910	3800	3450		3460	3360	3325
60							3510			
70							3300			
100	4590	4000	4180	4050	4000	3490	3440	3440	3390	3340
200		4300		3880		3540	3360	3360	3360	3290

$C_2H_2 + 2.5O_2$

α \ p_0	0.20	0.22	0.24	0.30	0.34	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
30						3580						
40						3260						
50	4150	4070	4020	3460	3250	3240	3340	3300	3050	3260	3150	3250
60				3360		3240						
70				3420		3520						
100	3820					3400	3210	3530	3100	3310	3240	
200	3600	3450	3800	3480	3730	3330	3190	3050	3100	3080	3100	

$C_2H_2 + 1.5O_2$

$C_2H_2 + 2O_2$

$C_2H_2 + 3O_2$

α \ p_0	0.30	0.40	0.60
200	3550	3310	2970
300	3480	3220	2910
400	3480	3200	2960
500	3455	3170	2830

Таблица 2

%C ₂ H ₂	%O ₂	$D, \frac{м}{сек}$	$T_D, ^\circ K$	$\frac{p_D}{p_0}$	Примечание
25	75	2332	4075	29.5	Из [6]
28.6	71.4	2426	4212	33.8	Из [8]
49.9	49.9	2944	4478	43.5	Из [6]
53	47	2816	4275	40.6	Из [7]
		(2750)	(4039)	(38.8)	$q_c = 170$ ккал
70	30	2441	3722	30.4	$q_c = 141$ ккал
					Из [6]

Таким образом, существование интенсивного свечения частиц C_2 в узкой области возле фронта детонации вызвано, по-видимому, их неравновесной концентрацией в зоне химической реакции. Благодаря высокой концентрации излучающих частиц в этой зоне можно измерить температуру газа по спектральным линиям его собственного излучения. Точность измерений будет определяться соотношением между шириной области свечения и измерительной щели, выделяющей участок наблюдения.

Результаты измерений максимальной температуры газа за фронтом детонации сведены в табл. 1. Для сравнения в табл. 2 приведены некоторые расчетные данные для детонации Чепмена — Жуге в ацетилено-кислородных смесях [7-9].

Сравнивая полученные значения температуры с расчетом, можно убедиться в том, что при уменьшении ширины щели наблюдения регистрируемая температура газа соответствует равновесному расчету.

Зависимость величины измеряемой температуры от ширины щели позволяет также произвести оценку протяженности зоны интенсивного свечения газа.

Поступила 30 X 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев Н. Н., Потапов А. В., Китаева В. Ф., Файзуллов Ф. С., Алямовский В. Н., Антропов Е. Т. и Исаев И. Л. Спектроскопическое исследование состояния газа за ударной волной. Изв. АН СССР, сер. физ., 1958, т. XXII, № 6, 732.
2. Файзуллов Ф. С., Соболев Н. Н., Кудрявцев Е. М. Температура азота и воздуха за ударной волной. Докл. АН СССР, 1959, т. 127, № 3, стр. 541.
3. Лосев С. А., Генералов Н. А. Об измерении температуры газа за ударной волной. Приб. и техн. exper., 1959, № 3, стр. 108.
4. Файзуллов Ф. С., Соболев Н. Н., Кудрявцев Е. М. Спектроскопическое исследование состояния газа за ударной волной. Оптика и спектроскопия, 1960, т. 8, № 5.
5. Gaydon A., Fairbairn A. Spectra produced by Shock Waves, Flames and Detonations. Proc. Roy. Soc., 1957, A239, 1219, 464.
6. Taylor G. The Dynamics of the Combustion Products behind Plane and spherical Detonation Fronts in Explosives. Proc. Roy. Soc, 1950, A200, 235.
7. Kistiakowsky G., Knight H., Malin M. Gaseous Detonations. The Acetylene — Oxygen Mixtures, J. Chem. Phys., 1952, v. 20, № 5, p. 884.
8. Kistiakowsky G., Zinman W. Gaseous Detonations. A Study of Thermodynamic Equilibration in Acetylene — Oxygen Waves. J. Chem. Phys., 1955, v. 23, №10, p. 1889.
9. Eisen C., Gross R., Rivlin T. The Theoretical Calculation of Gaseous Detonation. Combustion and Flame, 1960, v. 4, № 2, p. 137 (перевод: Вопр. ракетн. техн., № 1, 20, 1961).