

К ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗА ФРОНТОМ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗЕ

Р. И. Солоухин, С. Ж. Токтомышев (Новосибирск)

В работе [1] методом обращения спектральных линий были проведены измерения температуры газа за фронтом детонации в ацетиленокислородных смесях. Детали структуры фронта волны в этих опытах не рассматривались, но было отмечено существование скачка свечения газа вблизи фронта, которое вначале было отнесено к неравновесному свечению в зоне реакции. Авторы [2,3] также обнаружили начальный выброс свечения на осциллограммах, считая его следствием хемилуминесценции или каких-либо других неравновесных процессов во фронте. Сопоставляя длительность этого выброса в ацетиленокислородных смесях ($\Delta t > 10^{-6}$ сек) с данными о задержках воспламенения в этих смесях [4,5], можно убедиться, что период индукции, по крайней мере, в 10 раз короче длительности скачка свечения (например, $\tau \sim 10^{-7}$ сек) при $T = 2200 - 2500^\circ \text{K}$, $p \approx 2 \text{ атм}$). Поэтому объяснение отмеченного выше эффекта, с точки зрения кинетических данных, оказывается недостаточным. Хорошо известно, что при детонации в газе одномерная зона реакции обычно не реализуется, поэтому целесообразно сопоставить данные по свечению газа с одновременными записями давления — для выяснения влияния гидродинамических факторов на распределение свечения и температуры за фронтом.

1. Метод измерения температуры и оценка точности. Для измерения температуры и записи свечения применялось фотометрирование во времени двух спектральных линий водорода (H_β и H_γ), выделяемых спектрографом ИСП-51 с разрешением $\Delta\lambda \approx \approx 2 \text{ \AA}$ в центре линии. Этот метод в сравнении, например, с методом обращения линий обладает рядом преимуществ: а) здесь исключаются погрешности, вносимые измерениями цветовой температуры источника сравнения, особенно при температурах $T \approx 4000^\circ \text{K}$, когда применяется импульсный источник сравнения [1]; б) атомы водорода присутствуют в большинстве практически интересных химических реакций в газах; в) релаксационные времена атомарного водорода малы, что позволяет надеяться на безынерционную запись при их помощи хода изменения термического состояния среды во времени; г) наконец, вероятности перехода для балмеровской серии водорода вычисляются с достаточной точностью [6].

Основной причиной ограничений метода считается влияние самообращения линий, которое трудно оценить заранее. Из дальнейшего будет видно, что в проведенных опытах эти ограничения не давали заметных отклонений. Ошибки измерений можно оценить следующим образом. Температура газа вычисляется по формуле

$$T = \frac{E_2 - E_1}{2,3k} \left(\lg \frac{I_1}{I_2} - \lg \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{g_1}{g_2} \frac{A_1}{A_2} \right)^{-1}$$

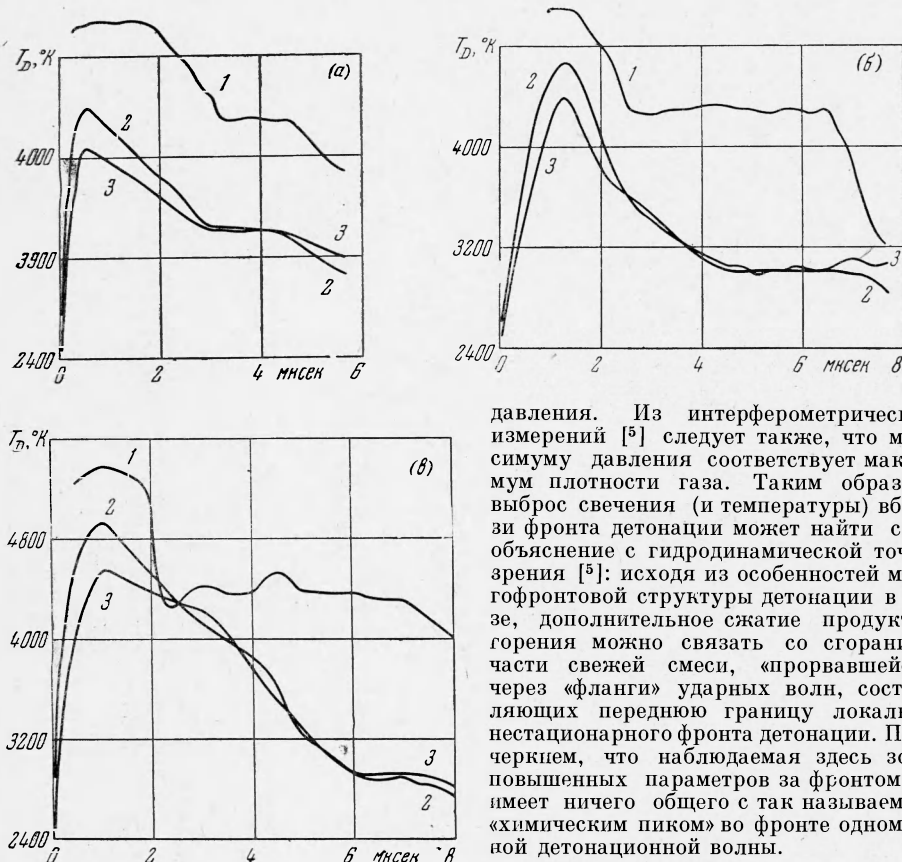
Здесь $E_i [эв]$ — энергия верхнего уровня, I_i — интенсивность линии, определяемая из светового потока ($\sim 2\text{\AA}$), g_i — статистический вес уровня, A_i — вероятность перехода. Соответственно

$$\delta T = \delta x \frac{kT}{E_2 - E_1} \quad \left(x = \frac{I_1}{I_2}, \quad \delta x = \frac{\Delta x}{x}, \quad \delta T = \frac{\Delta T}{T} \right)$$

Ошибки в определении x зависят от точности тарировки фотометрической системы, т. е. от ее линейности, от погрешностей при снятии спектральных характеристик ФЭУ, от толщины луча осциллографа и т. п. Контрольные опыты по проверке измерительной аппаратуры дают оценку $\delta x \leq 3\%$. Следовательно, $\delta T \approx 2\%$, т. е. $\Delta T \sim 80^\circ$ при $\Delta E = 0,5 \text{ эв}$ и $T \leq 4000^\circ \text{K}$.

2. Температура газа за фронтом детонации ацетиленокислородных смесей. Ход температуры за фронтом детонации иллюстрируют графики фиг. 1. Размеры взрывной камеры из оргстекла $900 \times 25 \times 3 \text{ мм}$, инициирование высоковольтной искрой, участок перехода горения в детонацию — несколько сантиметров. При начальных давлениях смеси порядка $0,05 \text{ атм}$ «равновесные» значения температуры, а также плотности и давления (см. [5]) достигаются лишь через $4-5 \text{ мксек}$ после прохождения фронта, а вблизи фронта, как уже отмечалось, существует начальный выброс свечения (и температуры). Рассмотрим вначале данные о «равновесных» температурах. На фиг. 2 приведены результаты измерений температуры для различных смесей в зависимости от начального давления. На фиг. 3 эти данные, экстраполированные к $p_1 = 1 \text{ атм}$, сравниваются с равновесным расчетом для детонации Чепмена — Жуге в этих смесях при начальном давлении 1 атм . Из приведенных данных видно, что для области газа, состоящей на $4-5 \text{ мксек}$ от фронта, измеренные температуры находятся в хорошем согласии с расчетными.

3. Сопоставление с измерениями давления. Оценка степени черноты газа. На фиг. 4 приведены осциллограммы давления и свечения H_{β} , полученные при различных начальных давлениях стехиометрической и равнообъемной смесей. Сопоставление свечения и давления указывает, что вблизи фронта (до 4 мксек) зоне повышенной температуры ($T \sim 5000^{\circ}\text{K}$) соответствует также и область повышенного (примерно на 30%)



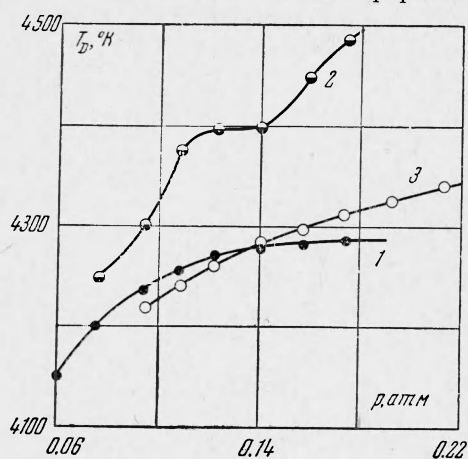
Фиг. 1. Ход изменения температуры T_D за фронтом детонации в ацетилено-кислородных смесях при $p_1 = 0.076$ атм; для а — 30% C_2H_2 , б — 40% C_2H_2 , в — 50% C_2H_2 . Кривые: 1 — температура, 2 — свечение H_{β} , 3 — свечение H_{γ} .

Спектроскопические исследования состояния газа за фронтом детонации были бы неполными без оценки степени черноты излучающих продуктов горения. Такие измерения были произведены в работе [2] для пересжатых детонационных волн. Метод измерения сводится к тарировке фотометрических каналов по абсолютной величине светового потока при помощи ленточной эталонной лампы накаливания и к сравнению получаемого светового потока с ожидаемой амплитудой сигнала для черного тела. Для «равновесных» участков наших измерений величина степени черноты в стехиометрической смеси оказалась равной: $a_1 = 0.18$ и $a_2 = 0.16$ соответственно для H_{β} и H_{γ} , что соответствует измерениям [2] в области других спектральных линий излучения.

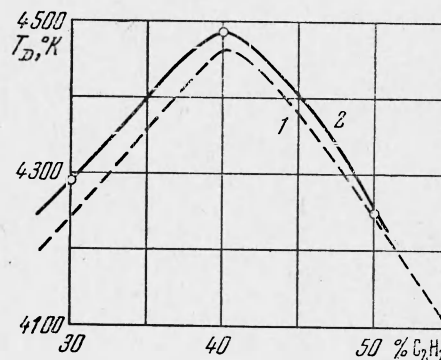
В заключение отметим, что результаты описанных выше измерений вполне подтверждают возможность применения метода относительных интенсивностей водородных линий для безынерционного определения температур $4000\text{--}5000^{\circ}\text{K}$ с точностью, находящейся в пределах ожидаемого разброса измерительной аппаратуры ($\sim 2\%$ по величине и менее 0.5 мксек по времени). Учитывая хорошую повторяемость детонационного процесса в ацетилено-кислородных смесях, данный способ измерений

давления. Из интерферометрических измерений [5] следует также, что максимуму давления соответствует максимуму плотности газа. Таким образом, выброс свечения (и температуры) вблизи фронта детонации может найти свое объяснение с гидродинамической точки зрения [5]: исходя из особенностей многофронтной структуры детонации в газе, дополнительное сжатие продуктов горения можно связать со сгоранием части свежей смеси, «прорвавшейся» через «фланги» ударных волн, составляющих переднюю границу локально нестационарного фронта детонации. Подчеркнем, что наблюдаемая здесь зона повышенных параметров за фронтом не имеет ничего общего с так называемым «химическим пиком» во фронте одномерной детонационной волны.

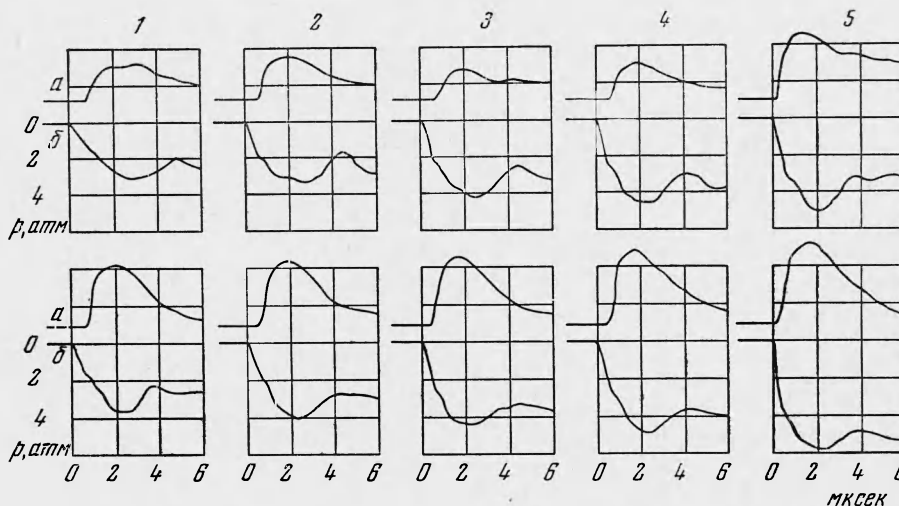
можно рассматривать и как «тарировочный» метод при создании измерительной аппаратуры (температура и давление) для изучения быстропротекающих высокотемпературных процессов в газах.



Фиг. 2. Зависимость «равновесной» температуры от начального давления смеси: 1—30% C_2H_2 , 2—40% C_2H_2 , 3—50% C_2H_2 .



Фиг. 3. Сравнение измеренных значений температуры, экстраполированных к $p_1 = 1$ атм, с расчетом: 1 — расчет; 2 — эксперимент.



Фиг. 4. Осциллограммы свечения (а) и давления (б) для стехиометрической (верхний ряд) и равновесной (нижний ряд) смесей: 1 — $p_1 = 0.06$ атм, 2 — 0.076, 3 — 0.093, 4 — 0.11, 5 — 0.14

Поступила 20 III 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Солоухин Р. И., Шарипова Т. А. Спектроскопическое исследование состояния газа за фронтом детонации. ПМТФ, 1962, № 2, стр. 37. См. также: Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах. Физматгиз, 1963.
2. Fairbairn A. R. Temperature measurements of C_2 and CN radicals generated in a shock tube. Proc. Roy. Soc., A, 1963, vol. 276, p. 513—526.
3. Gaudon A. G., Hurle I. R. The shock tube in high temperature chemical physics. London, 1963.
4. Kistiakowsky G. B., Richards L. W. Emission of Vacuum Ultraviolet Radiation from the Acetylene-Oxygen and the Methane-Oxygen Reactions in Shock Waves. J. Chem. Phys., 1962, vol. 36, p. 1707.
5. Солоухин Р. И. Структура многофронтной детонационной волны в газе. Научно-техн. пробл. горения и взрыва, 1965, № 2.
6. Бете Г., Солпитер Э. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами. Физматгиз, 1960, стр. 414—418.