

ПРИМЕНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗА

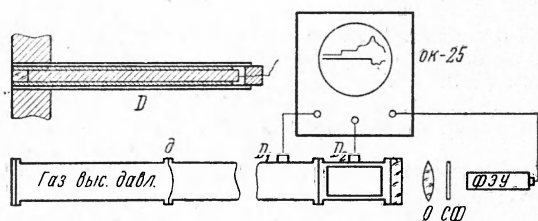
Р. И. Солоухин

(Новосибирск)

Основные особенности воспламенения газовой смеси за ударной волной рассмотрены достаточно подробно [1-2] и сводятся к следующему. После адиабатического однородного нагрева смеси в ударной волне в течение периода индукции реакции заметного изменения давления и плотности смеси не наблюдается — происходит процесс накопления активных центров реакции. По истечении периода индукции в отдельных точках объема нагретой смеси образуются очаги горения. После слияния системы очагов горение переходит в детонацию — наступает взрыв. Вторая фаза воспламенения сопровождается резким увеличением давления и температуры газа.

Выбирая ударные волны различной интенсивности и изменяя начальное давление смеси, можно независимо изменять температуру и давление реагирующего газа и получить зависимость периода индукции от этих параметров. Ниже приводятся результаты опытов по воспламенению некоторых газовых смесей и проводится оценка величины эффективной энергии активации в начальной стадии реакции.

1. **Определение температуры и задержки воспламенения.** На фиг. 1 показана принципиальная схема установки, на которой проводилось изучение процесса воспламенения газа. Ударная трубка имеет рабочий канал квадратного сечения 50×50 мм; она изготовлена из цельнотянутой латунной трубы. Секция низкого давления общей длиной 3.4 м имеет участок наблюдения с плоскопараллельными оптическими стеклами, составляющими часть боковых стенок канала. Торцевая стенка изготовлена из оргстекла.

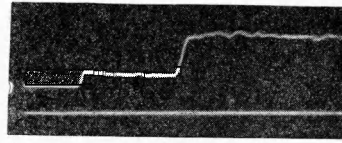


Фиг. 1. Схема установки

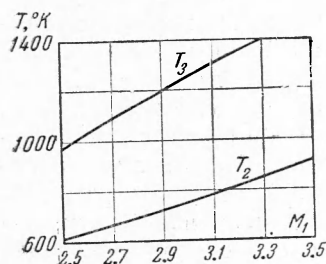
Скорость ударной волны и давление газа за ее фронтом измеряются с помощью двух импульсных пьезодатчиков давления, имеющих разрешающую способность во времени от 2 до 10 мксек. Точность определения скорости ударной волны 2%, а абсолютная величина давления определяется с точностью около 7%. Свечение объема газа, нагретого падающей и отраженной ударной волной, записывается во времени с помощью фотоумножителя. Рабочее положение умножителя показано на схеме. На фотокатод фокусируется весь объем нагретого газа через торцевую стенку. Из спектра свечения газа выделяется участок шириной около 100 \AA с помощью монохроматического интерференционного светофильтра. Сигналы с фотоумножителя и датчиков давления записываются импульсным двухлучевым осциллографом типа ОК-25.

Типичная осциллограмма давления процесса без химической реакции, записанная датчиком, отстоящим на 7.2 см от торцевой стенки, показана на фиг. 2. За падающей ударной волной наблюдается небольшой спад давления, вызванный потерями на трение у стенки. Давление за отраженной ударной волной, являющейся границей полного торможения газа, практически постоянно в течение всего времени реакции. Перепад давления в отраженной ударной волне в воздухе или в смеси $2 \text{ CO} + \text{O}_2$ с точностью опыта соответствует одномерному газодинамическому расчету с учетом зависимости теплоемкости газа от температуры [3].

В смесях, содержащих многоатомные газы (например, C_2H_5OH), давление непосредственно за фронтом отраженной ударной волны в среднем на 20% ниже расчетного и соответствует расчету для двухатомного газа. Затем наблюдается постепенный рост давления до расчетной величины (см. фиг. 5). Скорость отраженной ударной волны в смесях с многоатомными газами выше расчетной, в то время как для двухатомных газов ее величина соответствует расчету. Наблюдаемое отклонение может быть связано с задержкой возбуждения внутренних колебаний молекул многоатомного газа. В этом случае вычисляемое равновесное значение температуры за отраженной ударной волной может оказаться в начале нагрева несколько ниже действительного. Расчетные графики для определения температуры газа за ударной волной показаны на фиг. 3 и 4.



Фиг. 2. Осциллограмма давления падающей и отраженной ударной волны. Метки времени 20 мксек



Фиг. 3. Температура за падающей (T_2) и отраженной (T_3) ударной волной в смеси $2CO + O_2$

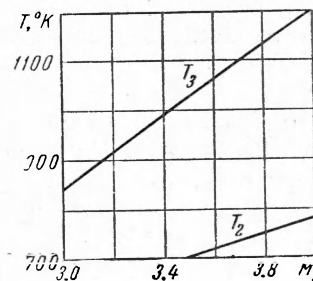
Соответствие измеряемых величин давления за отраженной ударной волной одномерному расчету указывает на то, что эффект неоднородности при отражении [4] в случае $M_1 \sim 2.5 \div 3.5$ можно считать малым.

На фиг. 5 показана осциллограмма процесса воспламенения в смеси $C_2H_5OH + 3O_2$. Нижняя кривая является записью свечения всего объема нагретого газа. Датчик давления расположен в районе наиболее вероятного положения места образования центров реакции (7.2 см от торца), что можно легко определить по совпадению на кривых давления и свечения выбросов, соответствующих моменту взрыва. Такое расположение

позволяет точно определить период индукции по записи давления. При помощи фоторазвертки процесса воспламенения на вращающуюся пленку было найдено, что область свечения возникает в точках, равноудаленных от стенок канала, т. е. в центральной части нагретого газа. Общая длина объема реагирующего газа составляет 15—20 см.

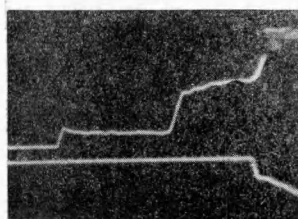
В случае сильных падающих ударных волн задержка определяется с помощью фотометрирования; так как уже на расстоянии 2.5—3 см от торцевой стенки происходит образование волны детонации (фиг. 6). На фиг. 7 показана осциллограмма процесса воспламенения на некотором расстоянии за фронтом падающей ударной волны. Интенсивность ударной волны здесь увеличена складывающимися с ней волнами сжатия, посылаемыми расширяющимися областями горения. Далее следует образование детонационных волн, одна из которых распространяется вслед за ударной волной, а другая — вверх по потоку. Между ними находится область разрезания, образованная в результате разлета продуктов взрыва.

Для определения зависимости времени задержки взрывной стадии реакции от температуры из серии опытов для данной смеси выбираются данные с одинаковым давлением за фронтом отраженной волны, которое определяется по осциллограмме. Отклонение от средней величины не превышает 10%.

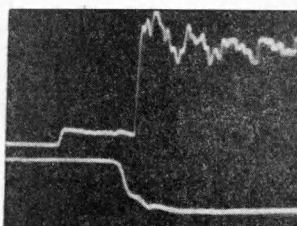


Фиг. 4. Температура за падающей (T_2) и отраженной (T_3) ударной волной в смеси $C_2H_5OH + 3O_2$

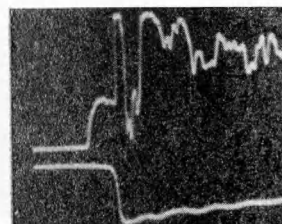
2. Оценка эффективной энергии активации. Зависимость времени задержки взрыва от температуры позволяет оценить величину эффектив-



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

Фиг. 5. Воспламенение в $C_2H_5OH + 3O_2$. Свечение $\lambda = 5120 \text{ \AA}$. Метки времени 20 мксек

Фиг. 6. Воспламенение в $2H_2 + O_2$ вблизи торцевой стенки. Метки времени 20 мксек

Фиг. 7. Воспламенение газа за падающей ударной волной

ной энергии активации реакции, протекающей во время периода индукции. В течение этого периода заметного изменения термодинамических параметров смеси не наблюдается. Поэтому процесс накопления активных центров реакции развивается в условиях постоянного давления и температуры. В силу сложности процесса химической реакции можно провести лишь оценку величины средней скорости реакции. Если предположить, что для начала взрывной фазы реакции необходима некоторая критическая концентрация C_* активных продуктов, то

$$C_* = \frac{dC}{dt} \tau$$

т. е. средняя скорость реакции обратно пропорциональна периоду индукции.

Считая, что зависимость скорости реакции от давления и температуры можно представить в виде

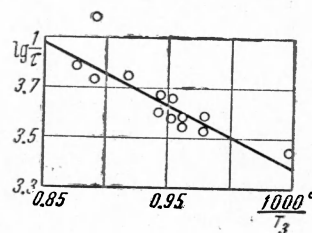
$$\frac{dC}{dt} = Ap^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

определяем энергию активации

$$E = R \frac{d \ln(1/\tau)}{d(1/T)}$$

Зависимость $\lg(1/\tau)$ от $1/T$ для смесей $2CO + O_2$ и $C_2H_5OH + 3O_2$ показана на фиг. 8 и 9. Для первой смеси энергия активации оказалась равной $28.4 \pm 2.5 \text{ ккал/мол}$, а для второй смеси $11.5 \pm 2.0 \text{ ккал/мол}$.

Институт гидродинамики
Сибирского отделения Академии наук СССР



Фиг. 9. Результаты опытов в смеси $C_2H_5OH + 3O_2$.
 $p_3 = 3.8 \pm 0.3 \text{ атм}$

Поступила
10 V 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Steinberg M., Kaskan W. V International Symposium on Combustion. N. Y., 1955, p. 664.
2. Зайцев С. Г. и Солоухин Р. И. К вопросу о воспламенении адиабатически нагретой газовой смеси. ДАН, 1958, т. 122, № 6.
3. Вукалович М. П., Кириллин В. А., Ремизов С. А., Силецкий В. С., Тимофеев В. Н. Термодинамические свойства газов. Судмашгиз, М., 1953.
4. Strehlow B., Cones A. Comment on Reflected Shock Wave Studies. J. Chem. Phys., 1958, vol. 28, № 15.