

ПРИКЛАДНІ ЗАДАЧІ ТЕРМОМЕТРІЇ

УДК 536.52:536.46:662.215

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

© Гусев П., Набоко И., Онуфриев С., Петухов В., Солцев О., 2003

Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН,
Москва, Россия

Описано методику вимірювань та експериментальні оцінки температури продуктів вибуху стехіометричної воднево-повітряної суміші в кінчному об'ємі. Температура під час вибуху вимірювалась на довжинах хвиль 649,5 та 1405 нм за допомогою швидкодійного пірометра, розробленого у ІПХФ РАН. Відзначено інтенсивне випромінювання газу під час вибуху. Так, наприклад, в експерименті, в якому тиск у верхній частині конуса досягнув 500 атм, яскравість газу, що світиться, була такою самою, як яскравість чорного тіла при температурі ~6000 К.

Описывают методику измерений и экспериментальные оценки температуры продуктов взрыва стехиометрической водородно-воздушной смеси в коническом объеме. Температура во время взрыва измерялась на длинах волн 649,5 и 1405 нм с помощью быстродействующего пирометра, разработанного в ИПХФ РАН. Отмечено интенсивное излучение газа во время взрыва. Так, например, в эксперименте, в котором давление в верхней части конуса достигло 500 атм, яркость светящегося газа была такой же, как яркость черного тела при температуре ~6000 К.

In the work the technique of measurements and experimental evaluations of temperature of products of explosion of hydrogen-air mixture in conic volume are described. The temperature measurements at the moment of explosion were conducted at wavelength 649.5 and 1405 nm by high speed pyrometer designed at IPCP RAS. The intensive radiation of gas during explosion was marked. For instance, in the experiment in which the pressure in the upper part of cone achieved 500 bar the brightness of luminous gas was the same as for black body at temperature ~6000 K.

Исследование режимов нестационарного горения газовых смесей имеет большое значение в решении проблемы безопасности различных объектов. Такие режимы могут возникать при инициировании смеси источниками малой энергии, однако развивающиеся в этих режимах давления могут во много раз превышать давление во фронте стационарной детонации. Режимы нестационарного горения изучены крайне мало и поэтому экспериментальное исследование этих режимов представляет большой интерес.

В ранее осуществленном исследовании горения водородно-воздушных смесей в коническом объеме в некоторых режимах давление в вершине конуса достигало 1000 атм и более при нормальных начальных условиях [1]. Это давление возникало вследствие взрыва в вершине конуса горючей смеси. Одновременно в вершине конуса наблюдалась яркая вспышка, фиксируемая фоторегистратором. Представ-

ляет интерес экспериментальная оценка температуры продуктов взрыва.

Экспериментальный объем состоял из стального усеченного конуса с углом при вершине 60° и диаметрами верхнего и нижнего оснований 26 и 600 мм и надетой на нижнюю часть конуса тонкой резиновой оболочки, внутри которой по оси конуса устанавливали источник инициирования водородно-воздушной смеси. Образовавшийся герметичный объем (≈ 130 л) заполняли водородно-воздушной смесью состава, близкого к стехиометрическому (29,9 % (об) H_2 + воздух) при нормальных условиях. Энергия такой смеси эквивалентна 95 г ТНТ. Как источник инициирования смеси использовали заряды гексогена массой не более 3 г, энерговыход которых составлял не более 5 % от теплосодержания исходной смеси. На боковой поверхности конуса имелось окно для фоторегистрации процесса и располагались датчики

давления. Сигналы с датчиков регистрировали с помощью осциллографов типа С9-8 и Tektronix TDS 5054. Установка детально описана в [1].

Измерения температуры с временным разрешением 40–500 нс были выполнены на двух длинах волн с помощью быстродействующего четырехканального пирометра (БП), разработанного и изготовленного в Институте проблем химической физики РАН. Пирометр имел такие характеристики: время нарастания переходной характеристики – 4 нс; выброс переходной характеристики – 3 %; нелинейность выходного сигнала при амплитуде до 1,5 В не более 0,3 %.

Излучение продуктов взрыва по двум световодам поступало на два канала пирометра, в которых были установлены интерференционные фильтры с максимумами пропускания на длине волны 649,5 и 1405 нм с полосой пропускания на уровне 0,5 от максимума – 5 и 18 нм соответственно. Длины волн выбирали, исходя из такого: $\lambda_1 = 649,5$ нм близка к эффективной длине волны ($\lambda_{ef} \approx 660$ нм) оптического пирометра (ОП), используемого при калибровке БП, и близка к длине волны максимума излучения в полосе излучения молекулярного азота (654,48 нм, [2]) – компоненты с наибольшей концентрацией в начальной смеси. Длина волны $\lambda_2 = 1405$ нм близка к длине волны максимума излучения (1387 нм) в полосе излучения H_2O – основного продукта реакции.

Были использованы кварц-полимерные световоды длиной ≈ 10 м с диаметром сердцевины 400 мкм, наружным диаметром 800–1000 мкм. Необходимое для пропускания излучения качество торцов световодов получали скалыванием кварцевой сердцевины. Свободные концы световодов заделывали на определенную глубину в сквозные отверстия в латунном наконечнике так, чтобы угловая апертура светового пучка, падающего на торец световода составляла $\approx 0,18$ рад. Световоды вводили в исследуемый объем газовой смеси через отверстие диаметром 5 мм в боковой поверхности конуса вблизи его вершины. Ось отверстия отстояла от верхнего основания конуса на 6 мм.

БП в сборе со световодами калибровали по излучению с известной температурой, в качестве которого использовали температурную лампу СИ-10-300. Для питания лампы использовали стабилизированный источник постоянного тока. Тело накала лампы с помощью конденсора, угловая апертура которого была больше угловой апертуры световодов, проецировали

на торец наконечника со световодами. Между конденсором и наконечником размещали диск с прорезью, который вращался со скоростью 3000 об/мин. На выходе двух каналов БП получали импульсный сигнал длительностью ≈ 200 мкс, амплитуда которого соответствовала температуре лампы. Эту температуру измеряли с помощью оптического пирометра (ОП) типа ЭОП–51 после прогрева лампы в течение часа.

Пробные эксперименты показали, что температура газа при взрыве достигает $T \approx 5000$ – 6000 К. При такой температуре $\lambda_1 T \approx 3250$ – 3900 мкм·К и $\lambda_2 T \approx 7030$ – 8430 мкм·К, т.е. при расчете температуры продуктов взрыва необходимо использовать формулу Планка для излучения черного тела.

Температуру продуктов взрыва определяли по отношению амплитуд сигналов на выходе БП, получаемых при калибровке и во время взрыва. В случае измерений на длине волны λ_1 , переходя от сигналов на выходе БП к световым потокам, можно записать [3]

$$\frac{U_{01}}{U_1} = \frac{K_1 \tau_1 b_{\lambda_1 T_{01}}^0 \Delta \lambda_1}{K_1 \tau_1 b_{\lambda_1 T_1}^0 \Delta \lambda_1} = \frac{b_{\lambda_1 T_{01}}^0}{b_{\lambda_1 T_1}^0} = \frac{\exp(C_2 / \lambda_1 T_1) - 1}{\exp(C_2 / \lambda_1 T_{01}) - 1}, \quad (1)$$

где U_{01} , U_1 – амплитуды сигнала на выходе БП при калибровке и в момент взрыва соответственно; K_1 – коэффициент пропорциональности, учитывающий чувствительность БП на длине волны λ_1 , площадь сечения сердцевины световода, апертурный угол световода с наконечником; τ_1 – коэффициент пропускания световода и оптической схемы БП в сборе на длине волны λ_1 ; $\Delta \lambda_1$ – полоса пропускания интерференционного светофильтра; $b_{\lambda_1 T_{01}}^0 = C_1 \lambda_1^{-5} [\exp(C_2 / \lambda_1 T_{01}) - 1]^{-1}$ – яркость излучения черного тела при температуре T_{01} ($b_{\lambda_1 T_1}^0$ – яркость при температуре T_1); T_{01} – яркостная температура излучения тела накала лампы, прошедшего через конденсор, на длине волны λ_1 , измеренная с помощью ОП; T_1 – температура продуктов взрыва, измеренная на длине волны λ_1 ; C_1, C_2 – первая и вторая постоянная в формуле Планка.

Во время измерений на длине волны λ_2 температура продуктов взрыва также определялась по отношению сигналов при калибровке и в момент взрыва по (1) с заменой у входящих в эту формулу величин индекса 1 на 2. Однако температуру T_{02} в

этом случае непосредственно не измеряли, а рассчитывали, учитывая, что при измерении температуры тела накала лампы с помощью ОП $\lambda_{ef} T_{01} \approx \lambda_1 T_{01} \approx 1420$ мкм·К и $\lambda_2 T_{02} \approx 2700$ мкм·К, что позволяет использовать закон Вина.

Расчет T_{02} – яркостной температуры излучения тела накала лампы, прошедшего через конденсор, на длине волны λ_2 выполняли так:

1) с помощью ОП определяли пирометрическое ослабление конденсора на длине волны $\lambda_1 \approx \lambda_{ef}$ и оценивали коэффициент пропускания конденсора τ_{11} [4];

2) предполагая равенство коэффициентов пропускания конденсора на длинах волн λ_1 и λ_2 , рассчитывали пирометрическое ослабление конденсора $A_{\lambda_2} = \frac{\lambda_2}{C_2} \ln \frac{1}{\tau_{11}}$ на длине волны λ_2 ;

3) используя значения спектральной нормальной излучательной способности $\epsilon_{\lambda T}$ вольфрама [5], по измеренной с помощью ОП яркостной температуре T'_{01} , рассчитывали истинную температуру тела накала лампы T_0 и определяли яркостную температуру тела накала T'_{02} на длине волны λ_2 ;

4) используя полученные значения T'_{02} и A_{λ_2} , рассчитывали T_{02} – искомую яркостную температуру

излучения тела накала лампы, прошедшего через конденсор, на длине волны λ_2 .

Результаты измерений и расчетов температур тела накала лампы представлены в табл. 1.

Отметим, что погрешность температуры T_{01} , измеряемой непосредственно с помощью ОП составляла ≈ 4 К, а погрешность оценки T_{02} составляла ≈ 20 К без учета погрешности предположения о равенстве коэффициентов пропускания конденсора на двух длинах волн.

Погрешность измерения температуры газа $\Delta T/T$ оценивали, используя в (1) при $\lambda_i T \leq 4000$ К ($i = 1, 2$) вместо формулы Планка формулу Вина,

$$\Delta T_1/T_1 = \frac{\Delta U_{01}/U_{01} + \Delta U_1/U_1 + C_2 \Delta T_{01}/(\lambda_1 T_{01}^2)}{\ln(U_{01}/U_1) + C_2/(\lambda_1 T_{01})}. \quad (2)$$

$\Delta T_2/T_2$ оценивали по выражению, аналогичному (2), отличающемуся от (2) тем, что в знаменателе добавляется единица, и индекс 1 заменяется на индекс 2. При 5000 К расчет дает: $\Delta T_1/T_1 \approx 1,3$ %, $\Delta T_1 \approx 70$ К; $\Delta T_2/T_2 \approx 4,5$ %, $\Delta T_2 \approx 230$ К.

В табл. 2 представлены условия осуществления опытов, результаты измерения давления в вершине конуса и оценки температуры продуктов взрыва.

Таблица 1

Яркостная и истинная температура тела накала лампы

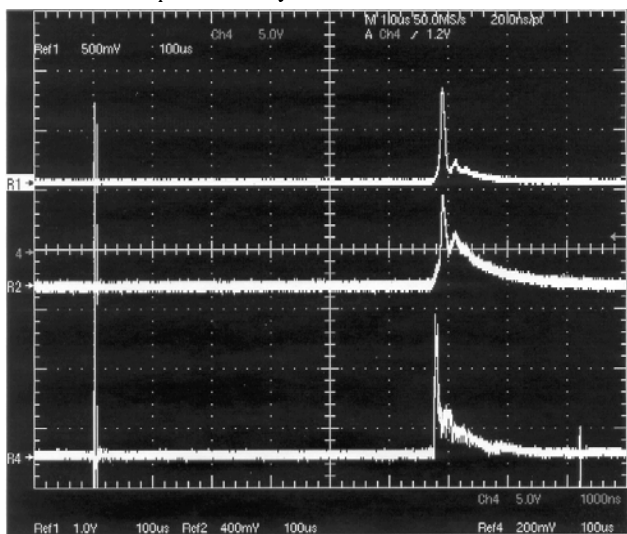
№	λ , нм	$\epsilon_{\lambda T_0}$	T_0 , К	T'_{01} , К	T'_{02} , К	T_{01} , К	T_{02} , К
1	649,5	0,423	2381	2176	–	2151	–
2	1405	0,304	2381	–	1866	–	1827

Таблица 2

Условия опытов, давление и температура продуктов взрыва

№ опыта	Содержание H_2 в смеси, % (об)	Масса гексогена, г	P , атм	T_1 , К	T_2 , К
1	31	2,75	406	–	6250
2	31	2,5	375	4230	5550
3	31	2,5	475	4030	4970
4	31	3,0	690	4820	5670
5	30	2,7	432	4900	5960

На рисунке изображены типичные осциллограммы изменения яркости свечения продуктов взрыва во времени. Первая и вторая кривые (сверху вниз) соответствуют регистрации на длине волны λ_1 и λ_2 , третья кривая соответствует записи давления в вершине конуса. Характерным для кривых изменения яркости свечения является совпадение моментов начала роста сигнала и достижения ими максимумов, а также наличие двух пиков. Максимум яркости свечения газа достигается спустя ≈ 10 мкс после пика давления в вершине конуса.



Осциллограммы изменения яркости свечения продуктов взрыва

В связи с быстрым протеканием процесса (70–150 мкс) возникают вопросы, связанные с установлением равновесия в системе. Необходимо выяснить, успевает ли установиться в системе химическое равновесие. При положительном ответе на этот вопрос можно попытаться оценить степень черноты продуктов взрыва. Обычно предполагают [6], что вследствие высоких температур и давлений, несмотря на быстрое протекание процесса, в газовой системе устанавливается химическое равновесие. В качестве косвенного подтверждения этому в [6] отмечают хорошее согласование рассчитанных из условий равновесия скоростей детонации в водородно-кислородно-азотных смесях и значений скоростей, полученных в эксперименте.

Подтвердить справедливость этого положения могут расчеты, выполненные в [7], где приводят

оценки минимального размера газовой смеси, состоящей из продуктов сгорания углеводородных топлив, при котором к системе применимо предположение о локальном химическом равновесии. В частности, получено, что при 4000 К и 100 атм – параметрах, приближающихся к зарегистрированным в наших опытах, минимальный размер составляет $l_{\min} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ см и с повышением температуры и давления имеет тенденцию к уменьшению. Используя это значение, оценим характерное время диффузии различных компонент смеси $t_{dif} = l_{\min}^2 / D$, где D – коэффициент диффузии компонент, и принимая, как в [7], время установления химического равновесия $t_{ch} \approx 0,1 t_{dif}$ оценим t_{ch} .

Коэффициенты диффузии D_1 и D_2 в смесях H_2O –воздух и H_2 –воздух соответственно при давлении 500 атм и температуре 6000 К рассчитывали по соотношениям и данным, приведенным в [8]. Было получено, что $D_1 \approx 0,02$ см²/с, а $D_2 > 0,02$ см²/с. Используя меньшее значение коэффициента диффузии, получим $t_{dif} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ с и $t_{ch} \approx 2 \cdot 10^{-7}$ с. Таким образом, можно считать, что локальное химическое равновесие во время взрыва водородно-воздушной смеси устанавливается за время $\approx 2 \cdot 10^{-7}$ с.

1. Минеев В.Н., Набоко И.М., Паршиков А.Н. и др. Горение и взрыв в замкнутой конической полости. Физический эксперимент // Теплофизика высоких температур. 1999. – Т. 37. – № 2. – С. 313–318. 2. Стриганов А.Р., Свентицкий Н.С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. – М., 1966. 3. Поскачей А.А., Чарихов Л.А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. – М., 1978. 4. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М., 1971. 5. Латышев Л.Н., Петров В.А., Чеховской В.Я. и др. Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. А.Е. Шейндлина. – М., 1974. 6. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – М., 1975. 7. Самуйлов Е.В., Рождественский И.Б., Цителаури Н.Н. Теплофизические свойства продуктов сгорания коксика ириабородинского угля // Теплофизические свойства продуктов сгорания канско-ачинских углей. Сб. трудов ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. 1976. – Вып. 55. – С. 5–27. 8. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение / Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М., 1989.