

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕН МИКРОКАЛОРИМЕТРАМИ

А. А. Зенин,
А. П. Глазкова, О. И. Лейпунский, В. К. Боболев
(Москва)

При анализе баланса тепла в различных зонах горящих конденсированных веществ может возникнуть потребность в измерении доли тепла, приходящего в рассматриваемую зону посредством излучения от пламени. Введение металлов, например, значительно повышает температуру и излучательную способность пламени, что приводит к увеличению лучистого потока на горящую поверхность. В настоящее время не представляется возможным оценить излучение такого пламени с известной температурой ввиду отсутствия надежных данных по излучательной способности горящих частиц металлов и их окислов. Так, в работе Ивеса и др. [1] излучательная способность окислов алюминия при длине волны 1 мк и температуре 1725° К составляла 0,01, для тех же условий в работе [2] она равна 0,21. Различные значения излучательной способности окислов алюминия приведены также в работах [3—5].

В работе Карлсона [6] определена излучательная способность (степень черноты) корунда в пламени кислорода с водородом в инфракрасной области при длинах волн от 1 до 10 мк. Обнаружено резкое (на два порядка) возрастание средней в этом интервале длин волн излучательной способности при плавлении корунда. Установлен также резкий рост излучательной способности корунда при нагревании от 2300 до 2900° К (от 0,01 до 0,1). Средняя излучательная способность MgO оказалась равной, по данным этой же работы, 0,4.

При горении твердого смесового топлива, содержащего металлические добавки, излучение происходит не только от раскаленных окислов, но и от частиц горящего металла. Состав излучения сложен, поэтому целесообразна разработка метода экспериментального определения суммарного излучения, приходящего от пламени в какую-либо из зон, например на реагирующую поверхность конденсированной фазы. Спектральный состав излучения при этом не столь важен, поэтому воспринимающий излучение элемент может быть просто черным телом. Воспринимающий элемент должен быть максимально простым и небольшим по размеру, что вытекает из условий эксперимента при изучении горения: однократность его использования и малые размеры излучаемых зон.

В настоящей работе предложен метод измерения суммарного лучистого потока с помощью микрокалориметров. Идея метода — измерение лучистого потока по скорости нагрева поглощающего тела — уже использовалась ранее с другой целью [7]. Микрокалориметром являлся медный диск (рис. 1), воспринимающая поверхность которого была зачернена (покрыта тонким слоем сажи), а с обратной стороны к диску приварена тонкая термопара (диаметром 30 мк). Для защиты от подо-

грева теплопроводностью диск помещался в плексигласовую оболочку толщиной 1 мм, воспринимающая поверхность закрывалась окошком той же толщины из кварца. Пропускная способность кварца позволяла регистрировать полностью излучение, приходящее от конденсированных продуктов пламени, и большую часть излучения газообразных продуктов. Угол зрения прибора практически равен 180°.

С помощью микрокалориметров были проведены две серии экспериментов: измерены лучистый поток от пламени на горящую поверхность модельной смеси и поле излучения в пламени на различных расстояниях от горящей поверхности (от 2 до 15 мм).

В первой серии экспериментов калориметр вставлялся в цилиндрический канал диаметром и высотой 3 мм (рис. 2, калориметр 1), находящийся в нижней части шашки (Ø 12 мм, $h=10$ мм). Калориметр приклеивался перхлориниловым лаком по периметру ко дну шашки, что устраняло проросок горения в канал и предохраняло калориметр от преждевременного выхода из строя. Шашка поджигалась сверху и когда горение доходило до канала, на калориметр начинал падать лучистый поток от пламени. Во второй серии экспериментов калориметр (рис. 2, 3), помещенный в защитную латунную гильзу, быстро (с помощью пружины) вводился в пламя горящей смеси или пробрасывался через пламя. Разогрев калориметра регистрировался медь-константановой термопарой, концы которой выводились из бомбы постоянного давления и через предусилитель подавались на шлейфовый осциллограф Н-700.

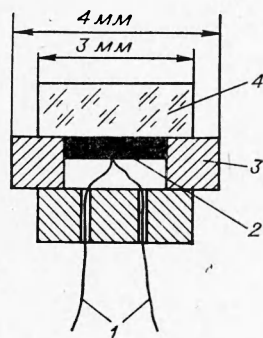


Рис. 1. Схема микрокалориметра (разрез).

1 — термопара; 2 — медный диск; 3 — кольцо с внутренним диаметром 2 мм; 4 — кварцевое окно.

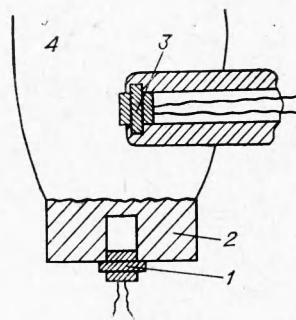


Рис. 2. Схема проведения опыта по измерению лучистого потока (калориметр 1) и поля излучения (калориметр 3) в пламени (4) горящего образца (2).

По скорости нагрева калориметром можно найти падающий на него лучистый поток. Зависимость температуры разогрева $T - T_0 = \Delta T$ от времени τ имеет вид:

$$\Delta T = \frac{q \frac{\pi d^2}{4}}{cm} \cdot \tau,$$

где q — плотность лучистого потока, $\text{кал/см}^2 \cdot \text{сек}$; d , c и m — диаметр, удельная теплоемкость и масса калориметра соответственно. Из коэффициента при τ , определяемого по началу экспериментальной кривой,

$\Delta T = f(\tau)$, нетрудно найти q . Примерная осциллограмма разогрева калориметра приведена на рис. 3.

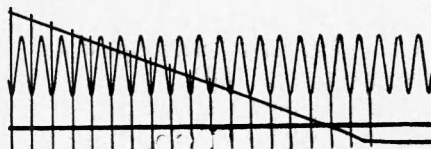


Рис. 3. Осциллограмма разогрева калориметра при горении смеси $\text{NH}_4\text{ClO}_4 + \text{полиформальдегид} + 10\% \text{ Al}$ при $p = 49 \text{ ат}$ (опыт с пробросом).

Для решения вопроса об инерционности микрокалориметров, рассмотрим одномерную задачу теплопроводности (рис. 4). На бесконечную пластину толщиной $2h$, плотностью ρ , теплоемкостью c и коэффициентом температуропроводности a в начальный момент времени начинает падать с обеих сторон лучистый поток с плотностью q . Найти распределение температуры по пластине как функцию времени. Решение этой задачи (см., например, [8]) имеет вид:

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q}{c \rho h} \left\{ \tau - \frac{h^2 - x^2}{2a} + \frac{h^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cos \mu_n \frac{x}{h} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} \right\},$$

где

$$A_n = (-1)^{n+1}; \quad \frac{2\pi}{(2n-1)\pi}; \quad \mu_n = \frac{(2n-1)\pi}{2}; \quad \text{Fo} = \frac{a \tau}{h^2}.$$

Для $x=0$ имеем:

$$T(0, \tau) - T_0 = \frac{q}{c \rho h} \left(\tau - \frac{h^2}{3a} \right).$$

Если бы тепло распределялось по пластине равномерно, то температура в центре ($x=0$) $T_{\text{ц}}$ определялась бы из выражения

$$T_{\text{ц}} - T_0 = \frac{q}{c \rho h} \tau.$$

Вводя постоянную времени выражением

$$\frac{T(0, \tau) - T_0}{T_{\text{ц}} - T_0} = e^{-1} = 1 - \frac{h^2}{3a \tau_0},$$

получим

$$\tau_0 = \frac{h^2}{1,9a}.$$

Для использовавшихся в большинстве экспериментов медных калориметров толщиной $0,4 \text{ мм}$ получаем $\tau_0 = 0,7 \text{ мсек}$, т. е. калориметр практически безинерционен, так как рабочий отрезок осциллограмм (время измерения) составлял $50\text{--}200 \text{ мсек}$.

Для проверки влияния теплоотдачи калориметра во внешнюю среду на его показания проводились эксперименты с калориметрами разной толщины — от $0,1$ до 1 мм . Систематических отклонений в показаниях замечено не было. Проверялось также влияние возможного подогрева калориметра горячими газами среды, в том числе через стенки оболоч-

ки калориметра. Для проверки брались калориметры, кварцевое окно которых закрывалось темной изоляционной лентой, прикрытой сверху тонким слоем асбеста. Нагрева калориметра в этом случае не обнаружено.

Для оценки влияния теплоотдачи от калориметра по термопаре, термопара медь — константан заменялась на манганин-константановую, теплопроводность которой существенно ниже. Эта замена не привела к изменению в показаниях калориметров.

В работе было исследовано также влияние размера канала шашки (в опытах первой серии). Обычно свободное пространство над стеклом калориметра составляло 2 мм, уменьшение этого расстояния до 1 мм и установка калориметра без свободного пространства оставляют лучистый поток практически неизменным. Размер канала не влиял на лучистый поток в экспериментах с каналом диаметром 1 и высотой 2 мм. Калориметр при этих измерениях имел диск диаметром 1 мм, толщину 0,4 мм, а стекло — диаметр и высоту 1 мм. Описанные выше эксперименты проведены со стехиометрической смесью перхлората аммония с полиформальдегидом, содержащей 10% алюминия (размер частиц 10 мк) при давлении 50 ат.

С помощью разработанной методики была измерена плотность лучистого потока q от пламени горящей указанной выше смеси в чистом виде и при добавлении к ней алюминиевого порошка¹ (средний размер сферических частиц

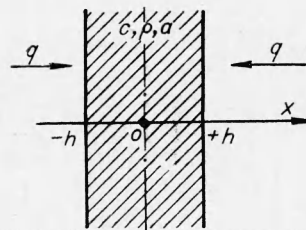


Рис. 4. Одномерная задача теплопроводности.

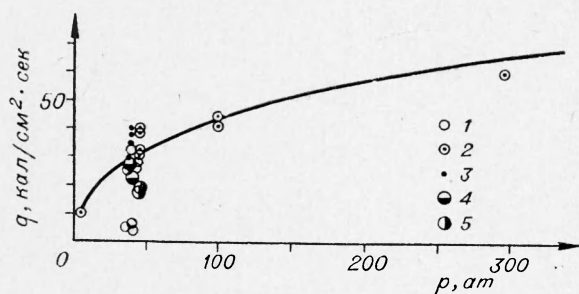


Рис. 5. Зависимость плотности лучистого потока от давления (опыты первой серии).

NH_4Cl_4 + полиформальдегид: 1 — чистый; 2 — смесь с 10% Al; 3 — смесь с 20% Al; 4 — смесь с 30% Al; 5 — смесь с 10% Al (0,2 мк).

~ 10 мк) в количестве 10, 20 и 30% по весу. Проводились также эксперименты с добавлением 10% тонкодисперсного алюминия (размер частиц около 0,2 мк). Опыты проводились в бомбе постоянного давления в атмосфере азота. Основные измерения сделаны при давлении 40—50 ат, некоторые эксперименты проводились также при давлениях 5—10; 100 и 250—300 ат.

На рис. 5 приведены результаты измерений величины q . Для смеси без алюминия при 40 ат $q = 5 \pm 1 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$. Расчет излучения газообразных продуктов сгорания представляет известные трудности из-за отсутствия надежных экспериментальных данных для основных компонент — газообразной воды и двуокиси углерода — при таких высоких давлениях и температурах. Излучение паров воды для наших условий может быть оценено по теории [9], дающей удовлетворительное согласие с экспериментальными данными при низких давлениях ($\sim 1 \text{ ат}$) и температурах (1660° K). Излучение CO_2 , дающее, впрочем, меньший вклад, может быть оценено весьма приблизительно [10]. При высоте пламени

¹ Алюминий добавлялся сверх 100%.

2 см излучение паров воды дает при 40 ат примерно $5 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$; излучение CO_2 — примерно $3 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$ (молярные доли паров H_2O — 0,46, CO_2 — 0,18, температура пламени 2800°K)¹.

Расчетные величины плотности лучистого потока не противоречат экспериментальным данным для смеси без алюминия, если учесть, что часть инфракрасного излучения CO_2 и H_2O при длинах волн, больших 4—6 мк, частично или полностью поглощается кварцем. (В кварце теряется, по-видимому, не больше 30% излучения.)

Из рис. 5 видно, что введение алюминия резко увеличивает плотность лучистого потока. При 40 ат для смеси с 10% Al $q = 31,5 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$ (со стандартной ошибкой $\pm 1,2 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$). Горящие частицы алюминия и раскаленные частицы Al_2O_3 имеют наибольшую интенсивность излучения при $\lambda_{\text{max}} = 0,9 \text{ мк}$, в то время как у газообразных продуктов (CO_2 и H_2O) наиболее интенсивные линии излучения при 4—6 мк, т. е. поглощение излучения конденсированных продуктов сгорания газообразными практически отсутствует и можно оценить раздельно долю каждого. Расчет показывает, что для смеси с 10% Al при $p = 40 \text{ ат}$ лучистый поток от газообразных продуктов, воспринимаемый калориметром, составляет $\sim 8 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$ (молярные доли паров H_2O — 34%, CO_2 — 7,5%, температура пламени 3280°K). Интересно отметить, что для смеси с 10% тонкодисперсного алюминия при 45 ат $q = 18 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$. Это уменьшение представляется естественным, так как частицы тонкодисперсного алюминия значительно меньше λ_{max} испускаемого излучения [9].

Для смеси с 10% Al измерена зависимость q от давления в интервале 5—300 ат: при $p = 5 \text{ ат}$ $q = 10 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$, а при $p = 300 \text{ ат}$ q составляет около $65 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$, причем примерно $25 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$ (оценка,

по-видимому, завышена), т. е. около 40%, составляет излучение газообразных продуктов.

В таблице приведены значения q для опытов второй серии (с пробросом калориметра) при различных расстояниях l от горячей поверхности. Из таблицы видно, что показания калориметра возрастают по мере его подъема над горячей поверхностью, приближаясь к показаниям первой серии. Это не означает, что продукты сгорания обязательно должны иметь различную светимость на разных расстояниях над поверхностью. Можно предполагать, что меньшие показания калориметров у поверхности объясняются другой геометрией излучающего тела, так как в этом случае часть угла зрения прибора занимает поверхность к-фазы.

Занижение q в опытах первой серии для смеси с 30% Al может быть объяснено наблюдающимся частичным заливанием стекла калориметра расплавом алюминия.

Занижение q в опытах первой серии для смеси с 30% Al может быть объяснено наблюдающимся частичным заливанием стекла калориметра расплавом алюминия.

¹ Температура и состав продуктов сгорания для данной смеси и смесей с алюминием рассчитаны на электронной машине М-20 в лаборатории Л. Н. Стесика, которому авторы выражают свою благодарность.

Состав смеси	$p, \text{ кг/см}^2$	$l, \text{ мм}$	$q_{\text{средн.}}, \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$
H_4SiO_4 + полиформальдегид + 10% Al	50	2	20
	50	15	25
	275	2	66
Та же смесь + 20% Al	50	15	27
Та же смесь + 30% Al	45	2	25
	275	2	97

Примечание. Средние значения q брались из двух-трех экспериментов.

Зная температуру и плотность потока излучения конденсированных продуктов пламени смеси с 10% Al (по опытам первой серии), можно оценить эффективную степень черноты ϵ горящих частиц алюминия и раскаленного корунда. Действительно, если считать излучающее тело бесконечным по радиусу шашки, то поток лучистой энергии, идущий от столба пламени с основанием в 1 см^2 , равен $\epsilon \sigma T_{\text{пл}}$, где ϵ — степень черноты пламени (или конденсированных продуктов, когда рассчитывалось излучение от них), σ — постоянная Стефана — Больцмана, $T_{\text{пл}}$ — температура пламени. Очевидно, этот же поток придет на единичную площадку поверхности, т. е. он равен измеренному q , поскольку телесный угол зрения калориметра практически равен 2π . Нетрудно видеть, что ϵ конденсированных продуктов сгорания растет с ростом давления: если при 40 ат $\epsilon=0,15$ (для смеси с 20% Al $\epsilon=0,13$), то для 275 ат $\epsilon=0,26$ (в расчетах бралась термодинамически расчетная величина $T_{\text{пл}}$).

Полученная эффективная степень черноты конденсированных продуктов будет соответствовать степени черноты поверхности этих частиц только в том случае, если длина свободного пробега фотонов значительно меньше размеров пламени. О. И. Лейпунским, В. Н. Маршаковым и А. А. Зениным с помощью киносъемки были определены длины свободного пробега фотонов в пламени пороха с добавками алюминия в тех же количествах и той же исходной дисперсности (горючее было другим). Длина свободного пробега видимых фотонов оказалась равной 3—5 мм. Изучаемые в настоящей работе пламена, очевидно, непрозрачны, так как имеют размеры в несколько сантиметров. В принципе не исключено увеличение степени черноты горящего алюминия и корунда с ростом давления, однако плотность тока излучения от пламени может возрасти и по другой причине: температура пламени горячей частицы алюминия не обязательно должна точно соответствовать термодинамической температуре пламени горячей смеси. Повышение давления может существенно увеличить скорость реакции окисления алюминия, т. е. скорость тепловыделения, что повлияет на температуру пламени частицы и она станет заметно выше термодинамической температуры. Степень черноты в этом предположении, очевидно, может оставаться неизменной.

Следует отметить сильное уменьшение показаний калориметров (во второй серии экспериментов), если они находились не в пламени, а снаружи вблизи него, что свидетельствует, по-видимому, о заметном охлаждении боковых частей пламени (в основном за счет турбулентного перемешивания с холодной средой).

В заключение отметим, что излучение высокой плотности от пламени в принципе может исказить показания термопар при измерении температурного распределения в зоне горения над поверхностью. Для оценки завышения температуры термоспая за счет излучения необходимо решить уравнение теплопроводности для термопары, проходящей со скоростью горения u газовую зону с линейно растущей температурой (градиент температуры φ град/см). Теплопроводность термопары принимается достаточно большой, теплотери в концы не учитываются. Уравнение имеет вид:

$$c \rho \frac{dT}{d\tau} = \frac{2\alpha (u \varphi \tau - T)}{h} + \frac{q}{h},$$

здесь c — теплоемкость; ρ — плотность; h — толщина; α — коэффициент теплообмена термопары со средой. Завышение температуры термоспая описывается выражением:

$$\Delta T = (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}) \left(\frac{q}{2\alpha} - u \varphi \tau_0 \right),$$

где τ_0 — постоянная времени термопары. Первый член в скобках — обычный временной множитель. Теплоподвод излучением и тепловая инерционность имеют противоположные знаки.

Оценка для рассматриваемых условий показывает, что подвод тепла излучением лишь частично (примерно на 70% при 40 ат для $h = 3,5$ мк) компенсирует тепловую инерционность термопар (см. [5]) и, следовательно, температурные измерения для изученных смесей должны быть достоверны.

ВЫВОДЫ

1. Разработан и обоснован метод измерения плотности лучистого потока (q) от пламени горящего конденсированного вещества с помощью микрокалориметров, обладающих малой тепловой инерционностью.

2. Изучено влияние содержания алюминия и размера его частиц на плотность лучистого потока от пламени модельной стехиометрической смеси перхлората аммония с полиформальдегидом и показано, что q увеличивается с ростом давления и содержания алюминия. Высказано предположение о причине роста q с увеличением давления.

3. Сделана оценка излучательной способности ϵ горящих частиц алюминия и корунда в пламени изученных составов; при 40 ат $\epsilon = 0,13$ – $0,15$.

4. Рассмотрено влияние лучистого потока на измерения распределений температур у поверхности рассматриваемых горящих составов с помощью тонких термопар и показано, что этим влиянием можно пренебречь.

Поступила в редакцию
1/VIII 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. H. E. Ives, J. Franklin. Inst., 1918, **186**, 401, 621.
2. G. Ritzow. Ann. Physik. Lpz., 1934 (5), 19, 769.
3. A. H. Sully и др. Appl. Phys., 1952, 3, 97.
4. René de Salins. Compt. Rend., 1952, 2437.
5. H. G. Wolfhard et W. G. Parker. Nature, 1948, **162**, 414.
6. Donald J. Carlson. 10-th Symposium on Combustion, 1965, p. 1413.
7. А. А. Ковальский, А. А. Зенин. Тепловые потери прибора КСВМ. Отчет ИХФ АН СССР, Москва, 1958.
8. А. В. Лыков. Теплопроводность нестационарных процессов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948, стр. 78.
9. С. С. Пеннер. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газа. ИЛ, 1963.
10. В. Мак-Адамс. Теплопередача. Металлургиздат, 1961.
11. А. А. Зенин, А. П. Глазкова и др. ДАН СССР, 1968, **181**, 3, 133.
12. А. А. Зенин. ПМТФ, 1963, 5.