

в указанной работе Колмогорова — Петровского — Пискунова тоже соответствует минимуму производства энтропии;

2) процесс установления стационарного фронта ламинарного пламени имеет много общего с установлением теплового баланса в цилиндрическом сосуде, наполненном реакционноспособной средой;

3) аналитические выражения для распределения температуры и концентрации имеют «нерасщепленный» вид, что более удобно в исследовательской работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
2. Карпов А. И., Булгаков В. К. Об одном нетрадиционном алгоритме расчета стационарной скорости распространения пламени // ФГВ.— 1990.— 26, № 5.— С. 137.

г. Томск

Поступила в редакцию 13/IV 1991,  
после доработки — 18/VIII 1992

УДК 535.33 : 536.5

Г. И. Левашенко, А. С. Сокольников, И. И. Доброхотов, Н. В. Мазаев

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Описан быстродействующий фильтровый радиометр «Кларнет» для измерения энергетических характеристик импульсных излучателей. Измерена сила излучения теплового излучателя в окнах прозрачности атмосферы, а также суммарная сила излучения в интервале 1,5—5,7 мкм. Определены эффективные температура и излучательная способность излучателя во времени.

Излучатели на основе взрывного горения экзотермических материалов находят широкое применение для решения ряда практических задач. Для более эффективного использования излучателей необходимо знать их энергетические характеристики в широкой области спектра. Известные радиометры [1], как правило, имеют небольшое угловое поле зрения и большую постоянную времени измерений в рабочем спектральном диапазоне. Поэтому они не могут быть использованы для измерения энергетических характеристик неоднородных импульсных излучателей больших размеров.

В настоящей работе описаны быстродействующий фильтровый радиометр «Кларнет» и результаты измерения силы излучения, эффективной температуры и излучательной способности импульсного теплового излучателя в отдельных участках спектральной области 1,1—5,7 мкм.

Радиометр «Кларнет» состоит из оптико-механического блока (ОМБ), установленного на юстировочной площадке с возможностью крепления на треноге, и блока управления (БУ) (рис. 1), укомплектованных сетевым и сигнальным кабелями. Радиометр устанавливается в направлении излучателя с параллаксом 0,14 м с помощью визира в виде бинокля БШУ 7×50, который жестко крепится на ОМБ.

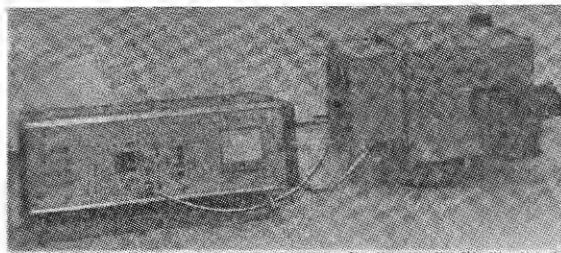


Рис. 1. Радиометр «Кларнет».

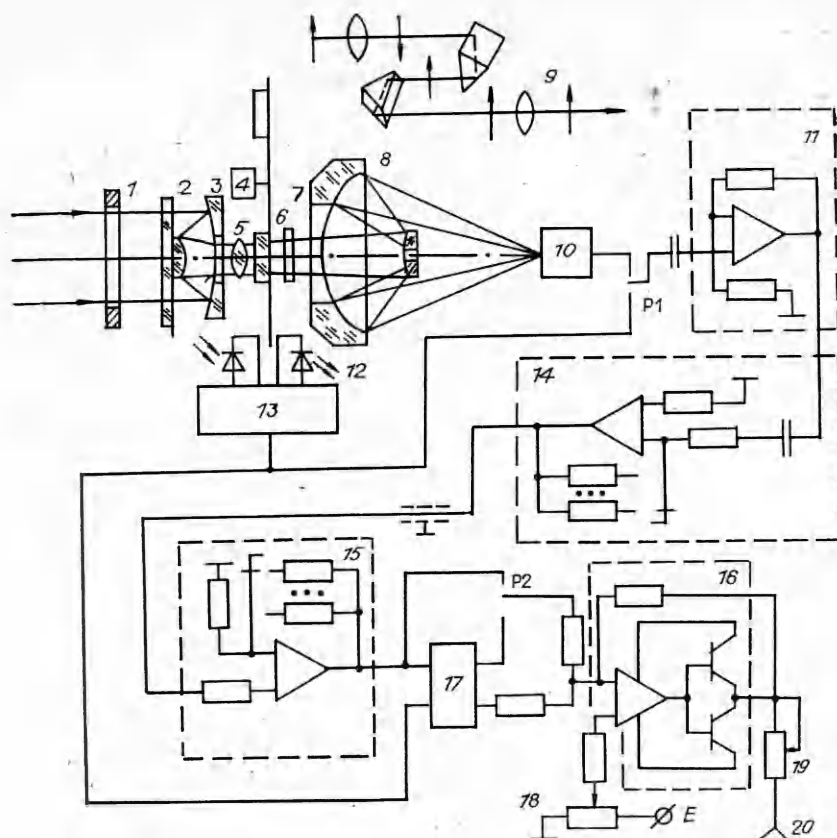


Рис. 2. Функциональная схема радиометра.

Функциональная схема радиометра приведена на рис. 2. Излучение от исследуемого источника через апертурную диафрагму 1 и защитное стекло из  $\text{CaF}_2$  2 поступает на первый объектив Кассегрена 3 с фокусным расстоянием  $f = 50,7$  мм и относительным отверстием 1:2,3. Коллектив 5 с  $f = 26,5$  мм, установленный в плоскости промежуточного изображения, направляет излучение через сменные светофильтры 6 на второй объектив Кассегрена 8 с  $f = 45,2$  мм. Объектив 8 проектирует промежуточное изображение на приемник излучения 19 в апертурном угле  $2\gamma = 64^\circ$  с увеличением  $\beta = 0,4$ . Интерференционные фильтры 6 установлены в кассете, которая вращается со скоростью 9000 об/мин. Нейтральный ослабитель 7 ( $\tau = 0,07$ ), установленный между вращающейся кассетой и охлаждаемым фотосопротивлением из InSb с приемной площадкой  $3 \times 3$  мм 19, предназначен для устранения фоновых сигналов.

Оптическая схема радиометра обеспечивает поле зрения  $2\omega = 9^\circ$ . С учетом виньетирования эквивалентный угол поля зрения  $2\omega_{\text{эв}} = 5,5^\circ$ . Время измерения при одной длине волны радиометром с вращающейся кассетой составляет 0,55 мс. Радиометр работает в режимах с вращающейся кассетой и с одним фильтром при постоянной времени измерений 0,02 мс, если время действия излучателя не превышает 80 мс. Фильтры устанавливаются поворотом кассеты с помощью фрикциона, расположенного на боковой стенке ОМБ. Радиометр укомплектован апертурными диафрагмами диаметром 16 и 20 мм.

Электрический сигнал, сформированный приемником излучения, усиливается широкополосным усилителем 11 ( $K_y = 2$ ), масштабным усилителем 14 ( $K_y = 2 \div 32$ ) и направляется в БУ, где усиливается вторым масштабным усилителем 15 ( $K_y = 1 \div 10$ ) и поступает на формирователь импульсов 17. Усилитель мощности 16 подключается с помощью реле  $P_2$  типа РС-15 к выходу формирователя импульсов 17 (при вращении

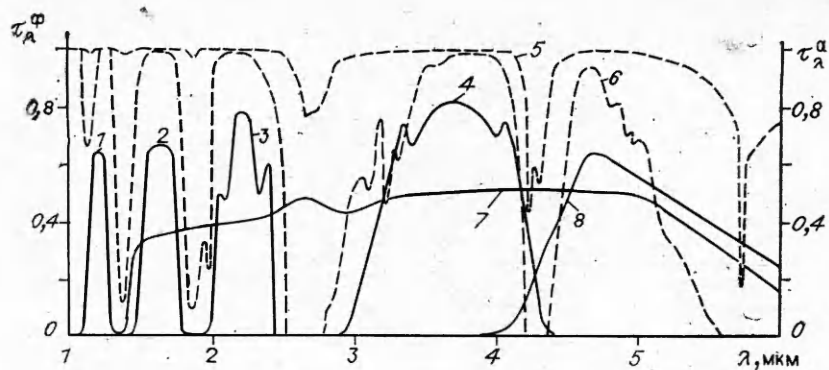


Рис. 3. Спектральные коэффициенты пропускания полосовых фильтров  $\tau_{\lambda}^{\phi}$  с  $\lambda_{\max} = 1,25$  (1), 1,65 (2), 2,2 (3), 3,7 (4), 5,0 (8), 1,5 ÷ 5,7 мкм (7) и слоя атмосферы  $\tau_{\lambda}^a$  толщиной  $l = 0,55$  (5) и 200 м (6).

кассеты) или к выходу масштабного усилителя (при одном фильтре). Выход усилителя мощности соединяется со светлоточевым или электронным осциллографом через переменный резистор «Уровень» 19 с возможностью коррекции нулевого уровня резистором «Установка нуля» 18.

Коэффициенты усиления радиометра в режимах с вращающейся кассетой и с одним фильтром одинаковы. Чувствительность измерительного канала радиометра контролируется подачей через реле  $P_1$  служебного сигнала, вырабатываемого формирователем синхроимпульсов 13 с помощью оптронной пары 12, установленной у щелей диска кассеты.

Оциллограмма аналоговых сигналов радиометра представляет собой последовательность импульсов одной полярности, амплитуды которых пропорциональны силе излучения излучателя в полосе пропускания фильтров. Начало и конец одного цикла измерений (шесть фильтров) выделяются на оциллограмме метками обратной полярности. Метка вырабатывается в формирователе импульсов 17 из служебного сигнала, снимаемого с формирователя синхроимпульсов 13, и подается на второй вход усилителя мощности 16, играющего одновременно роль суммирующего усилителя. Визир 9 служит для настройки радиометра на исследуемый излучатель. Для контроля напряжения стабилизированных источников питания 5, 15 и 27 В используется встроенный прибор.

Кассета укомплектована пятью полосовыми интерференционными фильтрами, расположенными в окнах прозрачности атмосферы, а также фильтром, сформированным отрезающим фильтром с  $\lambda_{\text{гп}} = 1,5$  мкм и спектральной чувствительностью приемника излучения. Для уменьшения амплитуды сигнала на последнем фильтре его коэффициент пропускания был занижен напылением на него слоя хрома. Коэффициент пропускания фильтров вне рабочей полосы  $\tau_{\lambda}^{\phi} = 0,001 \div 0,0025$ . Кривые спектрального пропускания светофильтров, а также атмосферы приведены на рис. 3. Спектральный коэффициент пропускания атмосферы рассчитывался по методике [2] в предположении, что ослабление излучения обусловлено только поглощением газовыми компонентами воздуха при температуре 20 °С и влажности 80 %. Ослабление излучения аэрозолем воздуха не учитывалось.

Градуировка радиометра по плотности энергетической яркости излучения осуществлялась для фильтров с  $\lambda_{\max} = 1,25, 1,65$  и 2,2 мкм с помощью калиброванной ленточной лампы СИ 10-300, а для фильтров с  $\lambda_{\max} = 3,7, 5,0$  и 1,5–5,7 мкм — модели абсолютно черного тела при температуре 900 К [3]. При этом ленточная лампа устанавливалась на расстоянии 1,25 м, а модель абсолютно черного тела — в непосредственной близости от радиометра, чтобы его входной зрачок полностью заполнялся излучением.

Сила излучения излучателя, расположенного на расстоянии  $L$  в полосе пропускания фильтров с  $\lambda_{\max} = 1,25, 1,65$  и  $2,2$  мкм, определялась по формуле

$$I_{\lambda}^{\text{и}} = I_{\lambda}^{\text{л}} \frac{K_{\text{у}}^{\text{г}} \tau_{\lambda}^{\text{г}} L^2 h_{\lambda}^{\text{и}}}{K_{\text{у}}^{\text{и}} L^2 h_{\lambda}^{\text{г}}} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{ср}} \right], \quad (1)$$

где  $I_{\lambda}^{\text{л}}$  — сила излучения лампы;  $K_{\text{у}}^{\text{г}}, K_{\text{у}}^{\text{и}}$  — коэффициент усиления;  $\tau_{\lambda}^{\text{г}}, \tau_{\lambda}^{\text{и}}$  — коэффициенты пропускания атмосферы в полосе пропускания фильтров;  $h_{\lambda}^{\text{г}}, h_{\lambda}^{\text{и}}$  — амплитуды сигналов; индексы г, и относятся к градуировке и измерению.

Сила излучения излучателя в полосе пропускания фильтров с  $\lambda_{\max} = 3,7, 5,0$  и  $1,5-5,7$  мкм определялась по формуле

$$I_{\lambda}^{\text{и}} = \frac{B_{\lambda}^0(T) \Omega_{\text{эвб}} K_{\text{у}}^{\text{г}} \tau_{\lambda}^{\text{г}} L^2 h_{\lambda}^{\text{и}}}{K_{\text{у}}^{\text{и}} \tau_{\lambda}^{\text{и}} K_{\alpha} h_{\alpha}^{\text{г}}} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{ср}} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $B_{\lambda}^0$  — плотность энергетической яркости излучения модели абсолютно черного тела в полосе пропускания фильтра;  $\Omega_{\text{эвб}} = 2\pi(1 - \cos \omega_{\text{эвб}}) = 0,007$  ср — эквивалентный телесный угол поля зрения радиометра;  $K_{\alpha} \geq 1$  — коэффициент, учитывающий виньетирование оптической системы; при угловых размерах излучателя  $\alpha = 2, 4, 6$  и  $8^{\circ}$   $K_{\alpha}$  принимает значения соответственно 1,65, 1,5, 1,3 и 1,1.

Эффективная (усредненная по площади) истинная температура  $T_{\text{эфф}}$  излучателя принималась равной цветовой [4] и определялась по измеренной силе излучения  $I \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{мкм}} \right]$  при  $\lambda_{\max} = 1,25, 1,65$  и  $2,2$  мкм, где основным излучающим компонентом является конденсированная фаза.

По измеренным во времени спектральной силе  $I_{\lambda}^{\text{в}} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{мкм}} \right]$  и  $T_{\text{эфф}}$ , а также измеренной независимым способом видимой площади  $S$  излучателя оценивали его эффективную спектральную излучательную способность

$$\varepsilon_{\lambda \text{эфф}} = \frac{I_{\lambda}^{\text{в}}}{B_{\lambda}^0(T_{\text{эфф}}) S}, \quad (3)$$

где  $B_{\lambda}^0(T_{\text{эфф}})$  берется при эффективной температуре излучателя.

Согласно выполненным оценкам, учитывающим наличие фонового пропускания фильтров, максимальная погрешность измерения силы излучения теплового излучателя радиометром «Кларнет» не превышала  $\pm 40\%$ , эффективной температуры  $+10\%$ , а эффективной излучательной способности  $\pm 40\%$ . Погрешность измерений, обусловленная нестационарностью процессов в излучателе, не учитывалась.

Исследуемый тепловой излучатель представлял собой продукты взрыва и горения пиротехнического состава на основе алюминия. Диспергирование и воспламенение металла осуществлялось зарядом из состава ТТ-40. Излучатель располагался на расстоянии 200 м от радиометра. Пентр поля зрения радиометра устанавливался на заряд алюминизированного топлива, выполненный в виде бесканальной цилиндрической пашки и поджигаемый электрическим импульсом. Угловые размеры излучателя не превышали  $2^{\circ}$ , а длительность излучения составляла  $\sim 200$  мс. Радиометр работал в режиме вращающейся кассеты при записи аналоговых сигналов на светолучевом осциллографе. Видимая площадь излучателя определялась по фотопленке кинокамеры СКС-1М.

Зависимости силы излучения излучателя в шести спектральных интервалах (см. рис. 3) во времени приведены на рис. 4. Видно, что при переходе к более коротковолновым окнам прозрачности атмосферы сила излучения в течение первых 60 мс возрастает даже при соответствующем

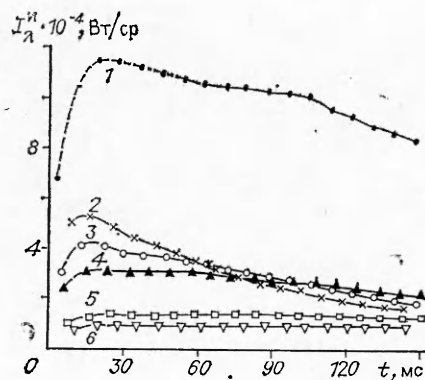


Рис. 4. Изменение во времени силы излучения  $I_{\lambda}^m$  в спектральных интервалах с  $\lambda_{\max} = 1,5-5,7$  (1), 1,25 (2), 1,65 (3), 2,2 (4), 3,7 (5) и 5,0 (6).

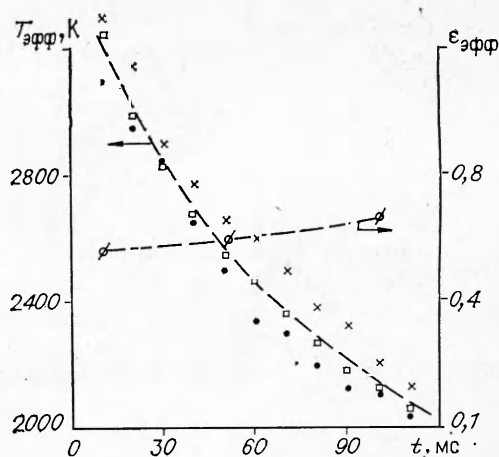


Рис. 5. Изменение во времени эффективной температуры и излучательной способности теплового излучателя.

уменьшении спектрального интервала. Это свидетельствует о том, что максимум излучения находится в еще более коротковолновой области спектра. При дальнейшем увеличении времени действия наибольшая сила излучения приходится на окно прозрачности атмосферы в области 2,2 мкм. Сила излучения в спектральном интервале 1,5—5,7 мкм на 20—30 % превышает сумму  $I_{\lambda}^m$ , измеренных в окнах прозрачности атмосферы, расположенных внутри этого интервала. Это легко объясняется при рассмотрении кривых пропускания фильтров и атмосферы (см. рис. 3). По сигналу при полосовом фильтре 1,5—5,7 мкм можно контролировать силу излучения все время действия излучателя.

На рис. 5 приведены значения эффективной температуры излучателя  $T_{эфф}$  во времени. Видно, что средняя по трем значениям эффективная температура излучателя при  $t = 10$  мс составляет 3230 К, затем резко уменьшается, достигая 2000 К при  $t = 120$  мс. При этом видимая площадь излучателя увеличивается в  $\sim 2,5$  раза. Эффективная излучательная способность излучателя  $\epsilon_{эфф}$ , усредненная по измеренным значениям при  $\lambda = 1,25, 1,65$  и 2,2 мкм, расположенных за пределами полос излучения молекулярных газов составляет  $\sim 0,6$ . Незначительное увеличение  $\epsilon_{эфф}$  во времени с ростом размеров и уменьшением температуры излучателя, вероятно, следует объяснить погрешностью измерений. Измеренная излучательная способность очень близка к значениям, полученным для пламен металлизированных топлив, сжигаемых в камере постоянного давления [5].

Таким образом, специально разработанный быстродействующий фильтровый радиометр «Кларнет» позволил измерить с приемлемой точностью силу излучения в окнах прозрачности атмосферы, а также эффективные температуру и излучательную способность теплового импульсного излучателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Безух Б. А., Бондарчик Л. В., Вербская Е. Ф. и др. Инфракрасные радиометры. — Минск, 1983. — (Препр./АН БССР. ИФ; № 309).
2. Инженерная методика расчета спектральной прозрачности атмосферы в области спектра 0,22—6 мкм для источников неселективного излучения. ГОИ им. С. И. Вавилова, 1982.
3. Левашенко Г. И., Мазаев И. В., Шуралев С. Л. // ЖПС. — 1990. — 53, № 2. — С. 339.
4. Кадышевич А. Е. Изменение температуры пламени. — М., 1961. — С. 14.

5. Бахир Л. П., Левашенко Г. И., Таманович В. В. Влияние химического состава металлизированных топлив на дисперсный состав, оптические характеристики частиц окислов и излучательную способность пламени // ФГВ.—1980.— 16, № 6.— С. 10.

г. Минск

Поступила в редакцию 5/IV 1991,  
после доработки — 15/VI 1992

УДК 541.127 : 662.741

П. А. Теснер

## СКОРОСТЬ РОСТА ЧАСТИЦ САЖИ

В работе сопоставлена найденная в ряде работ экспериментальная скорость роста частиц с расчетом по константам скорости роста пироуглерода в отсутствие сажеобразования.

Исследованию сажеобразования посвящено много работ и подробных обзоров [1, 2]. Однако процесс в целом изучен еще недостаточно. В последнее время опубликован ряд работ, где определена скорость роста частиц сажи при горении богатых смесей углеводородов в кислороде в условиях плоского пламени [3—7]. Эти работы имеют важное значение для понимания процесса сажеобразования в целом, так как основная масса частиц образуется за счет их роста.

В [8] приведены полученные уравнения констант скорости образования пироуглерода  $K$  при термическом разложении ряда углеводородов в условиях отсутствия сажеобразования. Предполагалось, что эти константы позволят рассчитать скорость роста сажевых частиц  $w$ . Однако в [9] показано, что в условиях сажеобразования величина  $w$  примерно на 2 порядка выше  $K$ . В [8] также обнаружен этот эффект, что объяснялось гибелью зародышей сажевых частиц на поверхности растущих частиц и возникновением на поверхности новых активных мест (зародышей роста).

В настоящей работе выполнен расчет для условий работ [5, 6], в которых содержатся подробные данные по скорости роста сажевых частиц и концентрации углеводородов в продуктах горения. Расчет значения  $w$  по константам первого порядка  $K$  проводился в предположении отсутствия торможения процесса водородом и аддитивности значения  $w$  для смеси углеводородов.

Для большей части углеводородов значения  $K$  взяты по данным [8], а для дпацетилена — по [10]

$$K = 4 \cdot 10^9 \exp(-62000/RT), \text{ г/(см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па)}.$$

Результаты расчета приведены в табл. 1 и 2. Фракции углеводородов с атомными массами 100—158, 153—202, 203—300 заменены для расчетов углеводородами: нафталин, атрацен и перилен с атомными массами 128, 178, 252; для фенилацетилен, метилнафталина, бензоперилена, перилена, коронена и триацетилен в литературе нет сведений по скорости образования из них пироуглерода. Эти константы оценены при сопоставлении с константами для аналогичных углеводородов.

В работах [11, 12] показано, что введение заместителей в бензольное кольцо ( $\text{CH}_3$ -,  $\text{OH}$ -,  $\text{Cl}$ -) приводит к росту  $K$  в 3—10 раз. Если принять для фенилацетилен и метилнафталина значения  $K$  на порядок выше, чем для бензола и нафталина, то для фенилацетилен  $K$  будет в 20 раз меньше, чем для бензола, а для метилнафталина в 4 раза меньше, чем для нафталина.

В ряду бензол, нафталин, антрацен при  $T = 1880$  К отношение констант скоростей составляет 4,20—3,34. Если принять на этом основании,