теплопроводностью. При сильном ветре вклад теплопроводности мал на фоне вынужденной конвекции, но он становится сравнимым с ней при слабом ветре. Поэтому вкладом теплопроводности объясняется то, что нижняя пороговая скорость $u_* < \omega$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **А. М. Гришин, В. Е. Абалтусов, А. Д. Грузин и др.** Экспериментальное исследование механизма распространения верховых лесных пожаров и тепломассообмена фронта пожара с окружающей средой. Деп. ВИНИТИ, № 4873—82.
2. **А. М. Гришин, А. Д. Грузин, В. Г. Зверев.** Докл. АН СССР, 1983, 269, 4, 822.
3. **А. М. Гришин, В. Г. Зверев.**— В кн.: Физика горения и методы ее исследования. Чебоксары, 1983.
4. **А. М. Гришин, А. Д. Грузин, В. Г. Зверев.**— В кн.: Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск, 1984.
5. **А. С. Дубов, Л. П. Быкова, С. В. Марунич.** Турбулентность в растительном покрове. Л.: Гидрометеоиздат, 1978.
6. **А. М. Гришин.** Математические модели лесных пожаров. Томск, 1981.
7. **А. М. Гришин.** Докл. АН СССР, 1984, 279, 3, 550.
8. **А. М. Гришин, В. П. Берцун, В. И. Зинченко.** Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
9. **Продуктивность** сосновых лесов/Под ред. А. И. Бузыкина. М.: Наука, 1978.

Поступила в редакцию 9/IX 1985

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ И СОДЕРЖАНИЯ ЧАСТИЦ САЖИ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ КЕРОСИНА

Г. И. Левашенко, С. В. Симоньков, В. И. Анцулевич

(Минск)

При сжигании углеводородного топлива (например, керосина) наряду с газами образуется конденсированный продукт неполного сгорания — полидисперсная сажа. Процессы образования частиц сажи изучаются давно [1], однако до сих пор не удалось теоретически рассчитать концентрацию и распределение их по размерам. Особенности механизма образования частиц сажи [2] приводят к различию их параметров в зависимости от типа топлива, условий сжигания и времени пребывания частиц в потоке. При определении параметров частиц в продуктах сгорания твердых и жидких топлив по ослаблению изучения в [3—5] использовались различные виды функций распределения частиц по размерам, а также оптические постоянные n, $\varkappa$ сажи из разных источников.

В [6] описана газодинамическая установка ГДУ-L-90 на продуктах сгорания керосина, сжигаемого в атмосфере подогретого воздуха при давлении 9—11 атм. Приведены измеренные перед сопловым блоком значения температуры и состава газообразных продуктов сгорания и показано, что в них присутствуют частицы сажи. Настоящая работа посвящена определению средних размеров и содержания частиц сажи на установке ГДУ-L-90 по ослаблению излучения, измеренному с помощью фильтрового спектрофотометра «Свирель-М» [7].

По данным гранулометрических исследований частиц сажи [8, 9] для описания распределения их по размерам в литературе предлагается однопараметрическая функция [8]

$$f^0(r) = (r/r_0)^2 \exp\{-[(r/r_0)^2 - 1]\}, \tag{1}$$

а также гамма-функция с параметром полуширины $\mu = 3$ [9]

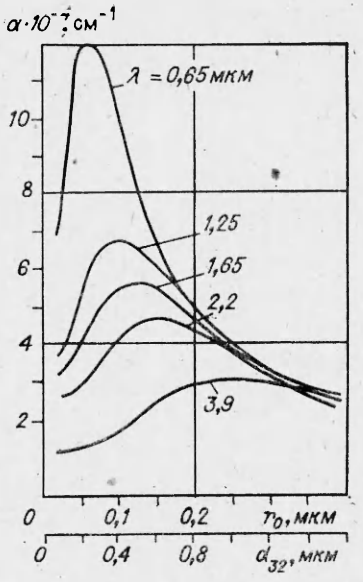
$$f^0(r) = (r/r_0)^\mu \exp\{-[\mu(r/r_0 - 1)]\}, \tag{2}$$

где r_0 — модальный (наиболее вероятный) радиус частиц.

В настоящей работе использовали функцию (2), для которой средний объемно-поверхностный диаметр полидисперсных частиц определяется выражением

$$d_{32} = 2r_0(1 + 3/\mu). \tag{3}$$

Оптические постоянные n и $\varkappa$ частиц сажи различного происхождения по литературным данным [10—13] характеризуются большим разбросом экспериментальных значений. Многие авторы утверждают, что оптические свойства сажи не зависят от температуры [14] и типа углеводородного топлива [4], если оно не содержит примесей, а определяются только структурой и химическим составом (атомарным отношением Н/С) [11—13]. Обычно n и $\varkappa$ сажи определяли по отражению излучения от таблеток, спрессованных из частиц, отобранных из продуктов сгорания, без учета пустот, объем которых определялся структурой частиц и давлением спрессовки. В [15] учтены наличие пустот в спрессованной саже, структура электронного облака частиц углеводорода и константы рассеяния и уточнены оптические свойства сажи, полученные в [12]. Значения n и $\varkappa$ при Н/С $= 0{,}07 \div 0{,}22$ с погрешностью $\pm 10\%$ приведены в [4, 15]. Химический анализ частиц сажи, снятых с внутренних стенок камеры перед сопловым блоком после 18 пусков установки показал, что среднее Н/С $= 0{,}55$. Поэтому использованные в расчетах значения n и $\varkappa$ из [15] принимались с погрешностью $\pm 15\%$.



Измерения для определения параметров частиц сажи целесообразно проводить вне полос поглощения газов. Ниже приведены значения n и $\varkappa$ для разных длин волн λ:

λ, мкм	0,65	1,25	1,65	2,2	3,9
n	1,89	1,90	1,91	2,02	2,47
$\varkappa$	0,50	0,67	0,82	1,00	1,48

Для частиц с функцией распределения (2) и указанных значений λ, n и $\varkappa$ рассчитаны (с помощью формул теории Ми [16, 17]) полидисперсные показатели рассеяния $\sigma(r_0)$ и ослабления $a(r_0)$ для единичного объемного содержания, а также индикатрисы рассеяния $P(\varphi)$ и доли изучения, рассеянного назад β. Расчет проводился при $r_0 = 0{,}02 \div 0{,}4$ мкм с шагом 0,02 мкм, пределы интегрирования выбирались из условия $f(r_{\text{пр}}) \leqslant \leqslant 0{,}001 \int f(r)\,dr$. Вероятности выживания кванта $\Lambda = \sigma(r_0)/a(r_0)$ для всех λ и r_0 не превышали 0,55.

Из рисунка видно, что определение параметров частиц сажи по ослаблению излучения, измеренному в области спектра 0,65—3,9 мкм, возможно только в случае, если с учетом (3) средний диаметр частиц $d_{32} \leqslant 1{,}2$ мкм, причем $a(r_0)$ при указанных λ принимают различные значения. Совпадение линии при $d_{32} \geqslant 1{,}2$ мкм соответствует исчезновению спектральной зависимости коэффициентов пропускания среды τ_λ при $\lambda = 0{,}65 \div 3{,}9$ мкм. Для определения параметров мелких частиц ($d_{32} < 0{,}8$ мкм) можно ограничиться диапазоном $\lambda = 0{,}65 \div 1{,}65$ мкм. В случае $d_{32} \geqslant 1{,}2$ мкм измерения необходимо выполнять при $\lambda \geqslant 3{,}9$ мкм.

Пропускание продуктов сгорания определяли спектрофотометром «Свирель-М» [7] при $\lambda = 0{,}65$; 1,65 и 2,2 мкм, для которых поглощение молекулярными газами не превышало 0,01. Сигналы от паразитного излучения, пропускаемого интерференционными фильтрами с характеристиками $\tau_{\lambda_m} > 0{,}5, \Delta\lambda_{0,5} = 0{,}03 \div 0{,}05$ мкм и $\tau_\Phi < 10^{-4}$, не превышали 1% от сигнала, обусловленного излучением, прошедшим через рабочую спектральную область фильтров (здесь τ_Φ — коэффициент пропускания фильтра за пределами его рабочей области). В блоке осветителя спектрофотометра использовали вольфрамовую лампу СИ6-100. Угловая апертура блока приемника и угол расходимости осветителя были одинаковы и не пре-

вышали 0,015 рад. Диаметр коллимированного пучка, просвечивающего исследуемую среду, составлял 0,015 м. Оптические блоки устанавливали на расстоянии 0,4 м от исследуемой среды. С помощью вращающейся кассеты с фильтрами спектрофотометр обеспечивал измерение τ_λ струи при всех λ за 0,15 с через каждые 0,26 с работы установки.

Анализ расчетных значений оптических характеристик частиц сажи, измеренных τ_λ, а также оптических параметров прибора «Свирель-М» с учетом результатов [18] показал, что в приближении однократного рассеяния излучения независимыми частицами относительная погрешность определения спектральных показателей ослабления на частицах сажи K_λ^0 по закону Бугера не превышает 3%. Поэтому при определении K_λ^0 однократно рассеянным вперед излучением можно пренебречь и ограничиться выражением

$$\tau = I/I_0 = \exp[-C_V a(r_0) L]. \qquad (4)$$

Здесь I_0 и I — интенсивности падающего на рассеивающую среду и прямо прошедшего через нее излучения; C_V — объемное содержание частиц; L — геометрическая толщина исследуемого слоя частиц; $K^0 = C_V a(r_0)$.

Для определения средних размеров и содержания частиц сажи решали уравнение (4) относительно $\lg C_V$ по измеренным значениям τ, L и $a(r_0)$, рассчитанным для набора значений r_0 функции распределения (2). Затем строили графические зависимости $\lg C_V$ от r_0 для каждой длины волны и по их пересечению находили d_{32} и C_V [16]. Область пересечения кривых при всех λ определяла величину погрешности нахождения d_{32} и C_V. Для оценки методических погрешностей определения d_{32} и C_V, обусловленных погрешностями n, $\varkappa$, τ_λ и выбором параметра μ функции (2), определяли изменение величин d_{32} и C_V при вариациях n, $\varkappa$ на ±15%, μ от 2 до 4 и τ_λ на ±2%. Полученные изменения составили соответственно ±6, ±2 и ±8% или в сумме ±16%. Ошибка измерения d_{32} и C_V по величине области пересечения кривых $\lg \lambda C_V(d_{32})$ составляла ±8—10%. Погрешность определения модального размера частиц, как известно [19], зависит от достоверности μ. Однако сравнение областей пересечения кривых $\lg_\lambda C_V(r_0)$, построенных для функции (2) с $\mu = 2$, 3 и 4, показало, что область для функции (2) с $\mu = 3$ минимальна. Это, вероятно, свидетельствует о том, что значение $\mu = 3$ близко к действительному. В этом случае при найденных r_0 и $\mu = 3$ можно говорить о функции распределения по размерам частиц сажи в потоке. Таким образом, методические погрешности определения параметров d_{32}, C_V и r_0 не превышали соответственно ±12, ±12 и ±15%.

Следует отметить, что способы определения параметров частиц в [20] чувствительны к несферичности частиц, и для частиц сажи либо неприменимы (метод малых углов), либо сложны при использовании в стендовых условиях (метод спектральной прозрачности и метод полной индикатрисы).

Частицы исследовали в измерительной камере, расположенной перед сопловым блоком установки [6]. Керосин ТС-1 сжигали в атмосфере воздуха, подогретого до 620 К, при коэффициенте избытка его $\alpha_I = 1{,}15$ с последующим вдувом вторичного воздуха при $\alpha_{II} = 1{,}15$. Время пребывания в потоке исследуемых частиц составляло ~0,02 с. Давление p и температуру T в камере определяли датчиком давления и температуры. Для защиты оптических окон камера с внутренним диаметром 0,09 м имела два специальных «кармана» толщиной 0,045 м, которые продувались во внутрь камеры азотом из баллона.

Обнаружено существенное влияние продувки на измеренные значения параметров частиц. При слабом вдуве, когда продукты сгорания заходили в «карманы», создавая турбулентный поток, τ_λ уменьшались, что приводило к завышению измеренной величины C_V. В другом предельном случае, когда азот не только вытеснял продукты сгорания из «карманов», но и воздействовал на них в камере, исчезала спектральная зависимость измеренных τ_λ. Это можно объяснить увеличением d_{32} до 1 мкм вслед-

Режим	p, атм	T, К	$\tau_{\lambda_1-\lambda_3}$	d_{32}, мкм	$C_V \cdot 10^6$	r_0, мкм	$g \cdot 10^3$, кг/м^3	g_0, %
I	8,8	1250	0,6÷0,75	0,52	0,6	0,13	1,1	0,045
II	8,6	1270	0,75÷0,82	1,0	0,55	0,25	1,0	0,04

ствие коагуляции частиц при столкновении под действием вдуваемого азота (см. рисунок).

Для измерения d_{32} и C_V с минимальной погрешностью экспериментально подбирали оптимальный режим, при котором азот только поджимал продукты сгорания, не допуская их прохождения в «карманы». Несоответствие продувки «карманов» оптимальному приводило к увеличению размеров частиц в 1,5—2 раза (при сильном вдуве) или завышению измеренного значения C_V более чем в 5 раз (при слабом вдуве). Поскольку давление в измерительной камере увеличивалось во времени на 0,2—0,4 атм, то при некотором давлении продувки на редукторе баллона в течение одного пуска установки осуществлялись последовательно три режима продувки «карманов»: сильный, оптимальный и слабый. При этом измеренные размеры частиц сначала уменьшались, а затем (в оптимальном режиме) принимали постоянные значения. Содержание частиц, наоборот, вначале не изменялось, а затем, по мере наполнения «карманов» продуктами сгорания, увеличивалось. Оптимальный вдув и действительные значения d_{32} и C_V определялись сравнительным анализом экспериментальных данных во времени. Погрешности определения d_{32}, C_V и r_0 в реальном потоке в оптимальном режиме продувки выше методических, но не превышали соответственно ±15, ±15 и ±20%.

Давление и температура продуктов сгорания, а также параметры частиц сажи, определенные при оптимальном и сильном вдуве, когда давление на редукторе баллона превышало номинальное на 0,5 атм, приведены в таблице (соответственно режимы I и II). При сжигании керосина ТС-1 в атмосфере подогретого воздуха при повышенном давлении частицы сажи имеют следующие параметры: $d_{32} = 0{,}52$ мкм, $C_V = 0{,}6 \cdot 10^{-6}$, $r_0 = 0{,}13$ мкм. В предположении, что плотность сажи равна 1900 кг/м^3, в таблице приведены значения абсолютного g и (с учетом расчетных данных о составе молекулярных газов) относительного g_0 массовых содержаний частиц в продуктах сгорания.

Таким образом, в результате применения развитой методики определения параметров частиц сажи по ослаблению просвечивающего излучения на трех длинах волн, уточняющей методическую погрешность измерений, измерены d_{32}, C_V, а также определена функция распределения частиц сажи, образующихся при сжигании керосина в газодинамической установке. Проанализировано влияние величины продувки «карманов», защищающих оптические окна от воздействия продуктов сгорания, на измеренные значения параметров частиц.

Авторы благодарят Е. К. Науменко за полезные замечания при обсуждении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **А. Гейдон, Г. Вольфгард.** Пламя, его структура, излучение и температура. М.: Металлургиздат, 1959.
2. **П. А. Теснер.** ФГВ, 1979, 15, 2, 3.
3. **Е. П. Болтрукевич, Г. С. Ратанов.** ФГВ, 1979, 15, 2, 187.
4. **Барт, Пагин.** Тр. Амер. общ-ва инж.-механ. Теплопередача, 1981, 2, 205.
5. **А. С. Борейшо, А. Ф. Леонов, Ю. А. Милицын.** ФГВ, 1983, 19, 6, 43.
6. **Л. П. Бахир, Ю. М. Беляков, Г. И. Левашенко и др.** ФГВ, 1985, 21, 4, 79.
7. **Г. И. Левашенко, Н. В. Мазаев, В. А. Немченко и др.** ОМП, 1985, 4, 18.
8. **М. А. Модзалевская, А. Г. Блох.** Теплоэнергетика, 1971, 3, 63.
9. **B. L. Wersberg, J. B. Howard, B. L. Willriams.** 14-th Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Institute, 1973.

10. **V. R. Stull, G. N. Plass.** J. Opt. Soc. Amer., 1900, 50, 2.
11. **P. J. Foster, C. R. Howarth.** Corbon, 1968, 6, 5, 719.
12. **Далзелл, Сарофим.** Тр. Амер. общ-ва инж.-механ. Теплопередача, 1969, 1, 96.
13. **V. P. Tomaselli, R. Rivera, D. C. Edewaard e. a.** Appl. Optics, 1981, 20, 22, 3961.
14. **I. H. Jchikawa, K. Kobayashi.** Carbon, 1966, 3, 3, 401.
15. **S. C. Lee, C. L. Tien.** 18-th Symp. (Intern.) on Combustion. Ontario, Canad, 1980.
16. **Г. И. Левашенко, В. И. Анцулевич, А. И. Дидюков и др.** ФГВ, 1985, 21, 6, 67.
17. **К. С. Шифрин.** Рассеяние света в мутной среде. М.: Гостехиздат, 1951.
18. **А. П. Иванов, А. Я. Хайруллина.** Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана, 1966, 2, 7, 721.
19. **А. П. Пришивалко, Е. К. Науменко.** ЖПС, 1972, 17, 5, 855.
20. **К. С. Шифрин.** Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. Минск: Наука и техника, 1971.

Поступила в редакцию 2/VII 1985,
после доработки — 28/I 1986

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОКИСЛЕНИЯ ВОДОРОДА В РЕАКТОРЕ ИДЕАЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ

В. Н. Вилюнов, В. К. Рябинин
(Томск — Челябинск)

Для исследования динамики газофазных химических реакций в проточных химических реакторах целесообразно перед этапом экспериментального моделирования проводить расчеты, позволяющие оценить характер поведения реактора на режимах запуска и регулирования. Наиболее простая модель химического реактора — реактор идеального смешения. Основные результаты по динамике воспламенения и нестационарного (в том числе и колебательного) горения в нем получены с использованием элементарной кинетики, включающей, как правило, одну реакцию [1, 2]. Однако большинство реакций горения газов имеют разветвленно-цепной механизм, что приводит к необходимости создания моделей горения в реакторе с использованием соответствующих кинетических механизмов [3].

В настоящее время большое внимание исследователей привлекает изучение кинетики взаимодействия газофазных H_2 и O_2. Механизм этой реакции сравнительно хорошо изучен и используется как модельный при изучении закономерностей цепных реакций в газах. Однако исследование процессов окисления водорода в подавляющем большинстве работ ограничивается рассмотрением закрытых систем без учета массообмена с окружающей средой [4, 5]. Изучение подобных процессов в открытых системах само по себе может дать интересную информацию об особенностях процессов воспламенения, погасания, стационарного и нестационарного горения в зависимости от интенсивности тепло- и массообмена, организации инициирования горения, соотношения расходов H_2 и O_2 и т. д.

Цель работы — исследование нестационарных процессов, в том числе воспламенения в реакторе идеального смешения на примере максимального кинетического механизма окисления водорода.

В рассматриваемом реакторе постоянного объема протекает m односторонних элементарных реакций между n компонентами (обратимые реакции рассматриваются как две независимые) со стехиометрическими уравнениями

$$\sum_{j=1}^{n} \nu_{ij} A_j = 0, \quad i = 1, 2, \ldots, m$$

(ν_{ij} — стехиометрические коэффициенты).

Ряд компонентов поступает в газообразном виде независимо друг от друга с массовыми расходами G_j^+. Реагирующая смесь отводится во внешнюю среду с расходом G^-. С целью повышения качества моделиро-