

УДК 621.454.3:535.2/4

Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя

В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишников

Вятский государственный университет, Киров

E-mail: ZagrayIA@yandex.ru

В работе представлена методика комплексного исследования теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя. Реализация методики позволила получить полную информацию по результатам всех этапов вычислений. Проанализирована зависимость оптических свойств (комплексного показателя преломления), радиационных характеристик (коэффициентов и сечений) и характеристик излучения (плотностей потоков, степеней черноты) от основных определяющих факторов и параметров. Методом вычислительного эксперимента установлено, что присутствие газовой фазы в продуктах сгорания приводит к ярко выраженной селективности излучения, вследствие чего использование серого приближения в расчетах теплового излучения неоправданно. Исследовано влияние оптических свойств, массовой доли, функции распределения частиц по размерам, температуры продуктов сгорания на тепловое излучение в факеле модельного ракетного двигателя. Количественно установлена роль «прожекторного» эффекта — увеличение энергии излучения выхлопных продуктов сгорания за счет рассеяния на частицах конденсата излучения из камеры сгорания.

Ключевые слова: тепловое излучение, гетерогенные продукты сгорания, факел, модельный ракетный двигатель, оптические свойства, радиационные характеристики, характеристики излучения, прожекторный эффект, вычислительный эксперимент.

Введение

Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания (ГПС) несет в себе информацию о природе объекта, агрегатном состоянии излучающей среды, дисперсности, составе и природе частиц, термо- и газодинамических параметрах, особенностях излучающего объема и т.д. Несмотря на большое число работ в области теплового излучения, направленных на решение отдельных конкретных задач, практически отсутствуют методические исследования, позволяющие одновременно учитывать все реально протекающие процессы в комплексе.

Изучение процессов горения и теплообмена в двигателях и энергетических установках авиационной и ракетно-космической техники приводит к необходимости создания методик расчета оптических свойств, радиационных характеристик различных оксидов, сажи и конструкционных материалов, методик расчета теплового излучения и соответствующих программных средств.

Эта потребность возрастает в связи с необходимостью прогнозирования характеристик новых двигателей и энергетических установок, с ростом теплонапряженности и установлением

более жесткого контроля за режимами их работы, интенсификацией теплообмена, планированием, оптимизацией и идентификацией эксперимента.

В данной работе проводятся исследования влияния некоторых особенностей процессов в ГПС на их характеристики излучения для факела модельного ракетного двигателя.

1. Комплексный подход при определении теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания

1.1. Факторы, определяющие тепловое излучение

Проблема применения комплексного подхода при определении теплового излучения требует более полного и систематического исследования оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения с учетом особенностей излучающих ГПС. В общем случае тепловое излучение ГПС определяется термо- и газодинамическими параметрами, радиационными характеристиками частиц конденсата, газовой фазы и ограничивающих поверхностей. Факторы, определяющие тепловое излучение ГПС, приведены на рис. 1 [1].

Радиационные характеристики конденсата определяются оптическими свойствами материала частиц, их размерами и дисперсностью. В настоящей работе основным компонентом конденсированной фазы продуктов сгорания модельного ракетного двигателя являются частицы оксида алюминия.

Частицы конденсата в общем случае представляют полидисперсную систему. Функция распределения для среза сопла и факела представляется гамма-распределением [1, 2]:

$$f(r) = \frac{a^{b+1}}{b!} r^b e^{-ar}, \quad (1)$$

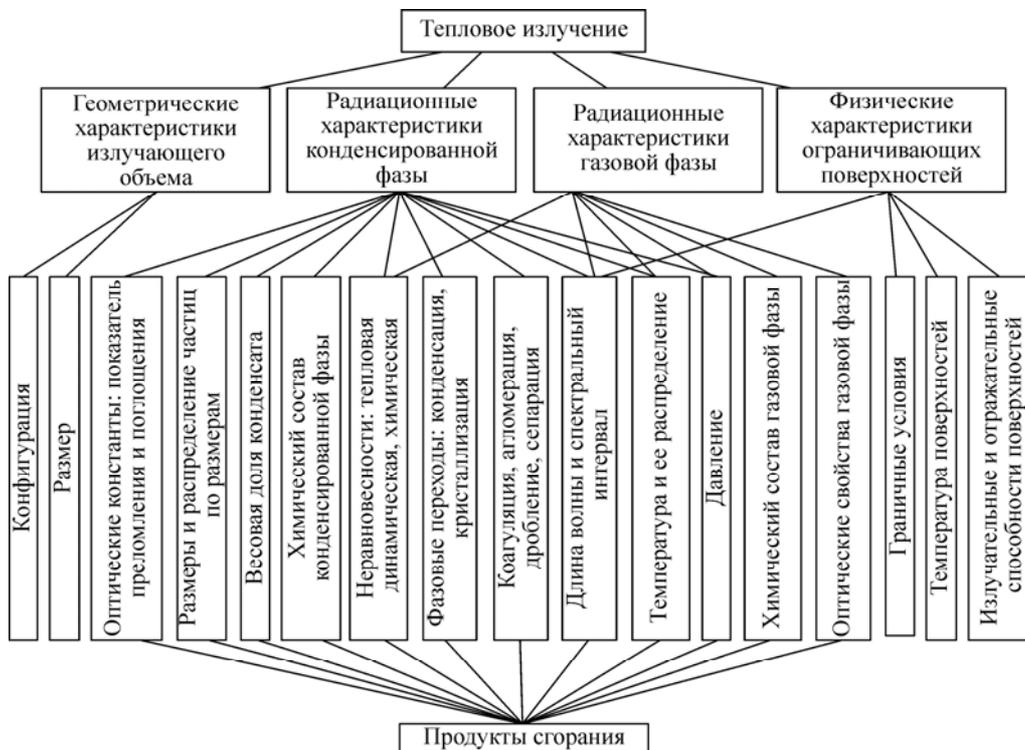


Рис. 1. Факторы, определяющие тепловое излучение ГПС.

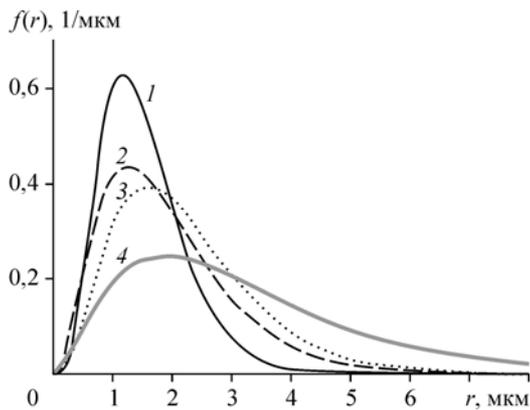


Рис. 2. Функции распределения частиц по размерам $f(r)$ для среза сопла и факела модельного ракетного двигателя.
 $a = 3$ (1), 1,6 (2), 1,6 (3), 0,8 (4) мкм⁻¹, $b = 3,5$ (1), 2 (2), 2,5 (3), 1,5 (4), $r_m = 1,17$ (1), 1,25 (2), 1,56 (3), 1,88 (4) мкм.

в котором величины a и b определяются по результатам экспериментов. Модальный радиус частиц $r_m = b/a$. Графики функции $f(r)$ с соответствующими параметрами a , b и r_m приведены на рис. 2.

Оптические константы n_1 (показатель преломления) и n_2 (показатель поглощения)

являются первичными радиационными характеристиками вещества, определяющими его способность поглощать и рассеивать падающее излучение. Для расчета использовалось аналитическое представление оптических констант Al_2O_3 в зависимости от длины волны λ и температуры T [1–4]:

$$\begin{aligned} n_1 &= 1,747 + 0,0066 \cdot \lambda - 0,0068 \cdot \lambda^2 + 0,00003 \cdot T, \\ \lg n_2 &= -2,19 + 0,089 \cdot \lambda^{0,95} - 0,00056(3200 - T)\lambda^{-0,45}. \end{aligned} \quad (2)$$

Выбор спектрального интервала, определяющего исследуемые оптические свойства, радиационные характеристики, а также характеристики излучения должен определяться температурой продуктов сгорания [2].

1.2. Интегро-дифференциальное уравнение переноса энергии излучения

Интегро-дифференциальное уравнение (ИДУ) переноса энергии излучения является одним из основных уравнений теории теплового излучения. При сгорании различных топлив в энергетических установках образуются ГПС, которые состоят из частиц конденсированной и газовой фазы. Смесь газовой фазы может поглощать проходящее тепловое излучение, а частицы конденсированной фазы — поглощать и рассеивать. Процесс рассеяния теплового излучения на частицах представляет собой процесс перераспределения энергии излучения по направлениям.

Гетерогенные продукты сгорания модельного ракетного двигателя следует рассматривать как светорассеивающую среду, ИДУ переноса энергии излучения для которой имеет вид [1]:

$$(\Omega \nabla) I_\lambda(r, \Omega) + k_\lambda I_\lambda(r, \Omega) = \beta_\lambda \int_{(4\pi)} I_\lambda(r', \Omega') \gamma_\lambda \left(r, r', \overset{\wedge}{\Omega \Omega'} \right) d\varpi' + \alpha_\lambda I_{\lambda \text{ АЧТ}}(r), \quad (3)$$

где Ω — направление, I_λ — спектральная интенсивность излучения, r — координата, ϖ — телесный угол, $I_{\lambda \text{ АЧТ}}$ — спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела, κ_λ , α_λ и β_λ — спектральные коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния, γ_λ — индикатриса рассеяния, знак ' — рассеяние назад.

Спектральный коэффициент поглощения α_λ ГПС представлялся суммой коэффициентов поглощения основной компоненты конденсированной и газовой фаз:

$$\alpha_\lambda = \alpha_{z\lambda} + \alpha_{г\lambda}.$$

Коэффициент ослабления единичного объема ГПС находился как

$$\kappa_\lambda = \alpha_\lambda + \beta_\lambda.$$

В работе для решения ИДУ использовался метод сферических гармоник, который является естественным математическим аппаратом для приближенного решения задач теории переноса. Простота решения задачи для плоского слоя позволяет отслеживать и устанавливать основные закономерности процесса теплового излучения в зависимости от исходных факторов и параметров.

Спектральные и интегральные плотности потоков (F_λ и F) через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению нормали, определялись по формулам

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda(r, \Omega) \Omega n d\Omega, \quad F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda,$$

где λ_1 и λ_2 — нижняя и верхняя границы спектрального интервала.

Спектральные и интегральные степени черноты (ε_λ и ε) находились следующим образом:

$$\varepsilon_\lambda = F_\lambda / F_{\lambda_{\text{АЧТ}}}, \quad \varepsilon = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda_{\text{АЧТ}}} d\lambda.$$

1.3. Радиационные характеристики ГПС

При решении ИДУ (3), исследовании процессов переноса энергии излучения в ГПС, моделировании процессов теплового излучения ГПС, содержащих твердые или жидкие частицы конденсированных оксидов металлов, необходимо знание радиационных характеристик частиц конденсированной и газовой фазы — коэффициентов ослабления κ_λ , поглощения α_λ , рассеяния β_λ и индикатрис рассеяния γ_λ .

Так как конденсированная фаза ГПС представляет собой в общем случае полидисперсную систему частиц, то соотношения между радиационными характеристиками единичного объема (РХЕО) принимают вид [5]:

$$\begin{aligned} \kappa_{z\lambda} &= N \int_0^\infty \sigma_{\text{осл}} f(r) dr, & \alpha_{z\lambda} &= N \int_0^\infty \sigma_{\text{полгл}} f(r) dr, \\ \beta_\lambda &= N \int_0^\infty \sigma_{\text{рас}} f(r) dr, & \gamma_\lambda &= \int_0^\infty \gamma_0(r) f(r) dr. \end{aligned} \tag{4}$$

Тепловое излучение ГПС определяется эффектами поглощения, рассеяния и излучения. Они, в свою очередь, носят статистический характер и определяются числовой концентрацией частиц N . Количество частиц конденсата в единице объема продуктов сгорания определяется выражением [1, 2]:

$$N = z \rho_\Gamma W_\Gamma / \left(4/3 \cdot \pi \int_0^\infty r^3 f(r) dr \cdot (1-z) \rho_\chi W_\chi \right),$$

где z — массовая доля частиц конденсата, ρ_Γ и ρ_χ — плотности газа и материала частиц конденсата, W_Γ и W_χ — скорости газа и частиц.

Радиационные характеристики частиц конденсированной и газовой фаз κ_λ , α_λ , β_λ и γ_λ (4) единичного объема ГПС рассчитываются через радиационные характеристики индивидуальных частиц (РХИЧ) — эффективные поперечные сечений ослабления $\sigma_{\text{осл}}$, поглощения $\sigma_{\text{полгл}}$, рассеяния $\sigma_{\text{рас}}$ и индикатрису рассеяния γ_0 .

Частицы считаются независимыми, если среднее расстояние между ними заметно превышает длину волны падающего на частицы излучения. В работах [5, 6] показано, что частицы можно рассматривать как независимые, если расстояние между ними в три раза превышает их радиус. Проведенная в работе [1] оценка среднего расстояния между частицами в ГПС применительно к условиям камеры сгорания, сопла, среза сопла и факела при различных режимах работы двигателей показывает, что условие независимости частиц соблюдается. Следовательно, независимость частиц позволяет изучать рассеяние одной частицей безотносительно к присутствию других.

Радиационные характеристики полидисперсных систем сферических частиц конденсированной фазы рассчитывались по теории Ми. Форма частиц принималась сферической. Для определения РХИЧ в качестве исходных данных необходимы дисперсия комплексного показателя преломления m , параметр дифракции ρ ($\rho = 2\pi r/\lambda$) и радиус частиц r [1, 2, 5]:

$$\sigma_{\text{осл}} = \pi r^2 K_{\text{осл}}(m, \rho), \quad \sigma_{\text{рас}} = \pi r^2 K_{\text{рас}}(m, \rho), \quad \sigma_{\text{погл}} = \sigma_{\text{осл}} - \sigma_{\text{рас}}. \quad (5)$$

Здесь $K_{\text{осл}}$ и $K_{\text{рас}}$ — факторы эффективности (безразмерные), определяемые по формулам [1, 2, 5, 7]

$$K_{\text{осл}}(m, \rho) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) / \rho^2, \quad (6)$$

$$K_{\text{рас}}(m, \rho) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) / \rho^2,$$

где a_n и b_n — амплитуды парциальных волн (коэффициенты Ми).

1.4. Представление индикатрисы рассеяния

Распределение рассеянного света по различным направлениям θ характеризуется индикатрисой рассеяния $\gamma_\lambda(\theta)$. Рассеяние возникает в среде, которая имеет неоднородности в виде малых частиц. Условием заметного рассеяния излучения на частицах является соотношение радиусов частиц r с длиной волны падающего на частицу излучения λ , определяемого параметром дифракции $\rho = 2\pi r/\lambda$ [6].

Индикатриса рассеяния для единичной сферической частицы в направлении угла рассеяния θ имеет вид [5]:

$$\gamma_0(\theta) = \lambda^2 [i_1 + i_2] / [8\pi^2 \sigma_{\text{рас}}],$$

где i_1 характеризует интенсивность рассеяния (скорость) излучения, поляризованного в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния, а i_2 — в плоскости рассеяния.

Индикатриса $\gamma_\lambda(\theta)$ для определения рассеяния излучения единичным объемом полидисперсной системы частиц при данной длине волны излучения λ с учетом формулы (4) принимает вид:

$$\gamma_\lambda(\theta) = \left[\lambda^2 \int_0^\infty [i_1 + i_2] f(r) dr \right] / \left[8\pi^2 \int_0^\infty \sigma_{\text{рас}} f(r) dr \right].$$

В некоторых методах решения уравнения переноса энергии излучения (методы сферических гармоник, дискретных ординат, характеристик и т.д.) индикатриса рассеяния представляется по полиномам Лежандра:

$$\gamma_\lambda(\theta) = 1/4\pi + 1/4\pi \cdot \sum_1^\infty A_n P_n(\cos \theta),$$

здесь A_n — коэффициенты, не зависящие от угла рассеяния θ , $P_n(\cos \theta)$ — полиномы Лежандра. Коэффициенты A_n можно определить по известным значениям $\gamma_\lambda(\theta)$ с использованием свойства ортогональности полиномов Лежандра [5]:

$$A_n = 2\pi(2n+1) \int_{-1}^1 \gamma(\theta) P_n(\cos \theta) d(\cos \theta).$$

В работе [8] были предложены аппроксимационные зависимости для нахождения первых трех членов разложения индикатрисы в ряд по полиномам Лежандра. Вычисления проводились для полидисперсной системы частиц оксида алюминия, описываемой функцией (1). Полученные результаты по трем членам разложения индикатрисы в ряд по полиномам Лежандра для наиболее часто представляемых в расчетах P_1 , P_2 , P_3 приближений метода сферических гармоник значительно упрощают и сокращают количество вычислений без потери точности конечного результата.

1.5. Комплексная методика моделирования оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения ГПС

Для комплексного исследования влияния основных параметров на излучение ГПС достаточно использовать следующую физическую модель [1]: внутренний равномерно распределенный по объему источник излучения, одномерная геометрия (плоский слой или бесконечный цилиндр со свободной границей), постоянные температура и давление продуктов сгорания, полидисперсная система конденсированных частиц с заданной функцией распределения частиц по размерам и фиксированный состав газовой фазы.

Математическая модель предусматривает вычисление оптических свойств по аналитическим зависимостям (2), радиационных характеристик частиц (4)–(6) по теории Ми и по различным приближениям для больших и малых частиц, характеристик излучения путем решения уравнения переноса энергии излучения (3) в P_3 -приближении метода сферических гармоник с применением матричной факторизации для одномерной геометрии. Индикатриса рассеяния представлялась в ряд по полиномам Лежандра.

Необходимые для решения уравнения (3) радиационные характеристики единичного объема частиц конденсата (κ_λ , α_λ и β_λ) рассчитывались по методикам работ [2, 5, 9]. При расчетах радиационных характеристик индивидуальных частиц необходимые значения комплексного показателя преломления m и функции распределения частиц по размерам $f(r)$ брались из предыдущих работ авторов и других литературных данных [1–4, 9, 10]. Используемая при решении уравнения (3) индикатриса рассеяния γ_λ рассчитывалась по методике работы [5].

В качестве компонентов газовой фазы ГПС рассматривались молекулы H_2O , CO , CO_2 , HCl , O_2 , H_2 , N_2 . Коэффициент поглощения газовой фазы $\alpha_{T\lambda}$ вычислялся с использованием информационной системы SPECTRA (<http://spectra.iao.ru>) [11], включающей банки данных HITRAN [12], HITEMP [13] и др. Используемый в работе спектральный интервал $\lambda = 0,3–6$ мкм ($\Delta\lambda = 0,01$ мкм) и температурный диапазон 2600–2750 К соответствовал основной доле энергии излучения газовой и конденсированной фаз для условий факела модельного ракетного двигателя.

Представленная методика расчета реализована в комплексной программе «СПЕКТР», написанной на языке программирования Fortran и разработанной в Вятском государственном университете под руководством В.А. Кузьмина и Е.И. Мараткановой [14].

2. Проверка надежности разработанной методики

С целью проверки работоспособности методики и созданной вычислительной модели проведено сопоставление с результатами работы [15] по расчету уровня инфракрасного излучения основного участка факела выхлопной струи ракеты. В работе [15] приведено приближенное решение ИДУ с помощью шестипотоковой программы SIRRМ, исследовано

влияние рассеяния на инфракрасное излучение факела низкотемпературной твердотопливной ракеты с металлизированным топливом (НТРМТ) — смесь алюминия с перхлоратом аммония (NH_4ClO_4). Исходные данные и допущения, приведенные в работе [15], использовались авторами настоящей работы для расчетов по собственной методике. Факел моделировался цилиндром диаметром 0,2 м и длиной 6 м. Предполагалось, что цилиндр является изотермическим и имеет однородные по объему концентрации конденсированных частиц и газа. Для рассматриваемых условий давление $p = 10^5$ Па, температура в факеле $T = 1000$ К, молярная масса продуктов сгорания $\mu = 0,028$ кг/моль, массовая доля конденсата $z = 0,1$. Частицы конденсата сферические и одинакового размера ($R = 0,1$ мкм). Инфракрасное излучение такого факела создавалось газами H_2O , HCl , CO , H_2 и N_2 . Их массовые доли соответственно равны 0,3, 0,13, 0,2, 0,4 и 0,05. На рис. 3а представлены спектры основных газовых компонентов, полученные с помощью базы данных HITRAN [13] (с заданными $T = 1000$ К и фойгтовской формой контура отдельной линии). На рис. 3б приведен суммарный коэффициент поглощения газовой фазы $\alpha_{T\lambda}$ для рассматриваемых условий. Наибольший вклад в суммарный коэффициент поглощения газовой фазы вносят молекулы HCl (в диапазоне $\omega = 2500\text{--}3100$ см^{-1}) и H_2O (во всем диапазоне $\omega = 2000\text{--}5000$ см^{-1}). Роль компонентов H_2 и N_2 пренебрежимо мала (величина $\alpha_{T\lambda}$ находится в районе 10^{-12} 1/мм и меньше).

Для решения задачи переноса излучения в среде, содержащей помимо газа рассеивающие частицы, важной составляющей является информация о спектральной зависимости n_1 и n_2 . Анализ оптических констант оксида алюминия показывает, что противоречивость и разобщенность имеющихся данных объясняется моно- и поликристаллическим строением образцов, наличием примесей (в том числе сажи), предшествующим состоянием вещества (температурный гистерезис). Также это связано с различием в исходных материалах, окружающей среде и способах измерения. Если значения по n_1 в работах разных авторов сопоставимы между собой, то результаты по n_2 могут отличаться на несколько порядков. В этой связи проведено сравнение результатов моделирования излучения факела НТРМТ с использованием различных данных по n_2 . Полученные результаты соответствуют направлению, нормальному оси выхлопа струи. Влияние атмосферы не учитывалось.

На рис. 4 показана спектральная интенсивность излучения I_ω . Интегральная интенсивность излучения I определялась как интеграл от спектральной интенсивности I_ω по заданному интервалу $\omega = 2000\text{--}5000$ см^{-1} . Проведенные расчеты по методике настоящей работы показывают (рис. 4а–4с), что постепенное изменение в ходе кривых согласуется с результатами работы [15] (рис. 4д). Помимо основных колебаний, у величины I_ω возникают вторичные осцилляции в области ω от 3250 до 5000 см^{-1} , не показанные

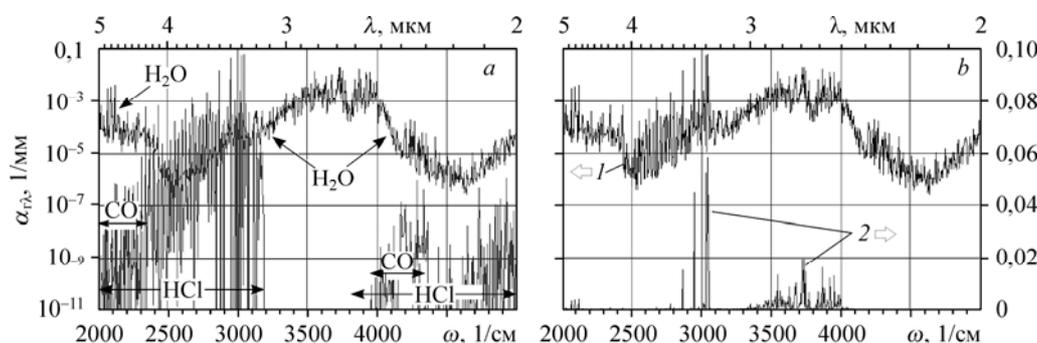


Рис. 3. Спектральный коэффициент поглощения газовой фазы $\alpha_{T\lambda}$ для НТРМТ ($\Delta\omega = 5$ см^{-1}). а — спектры отдельных компонентов с учетом массовых долей, б — суммарный коэффициент в логарифмическом (1) и линейном (2) масштабах.

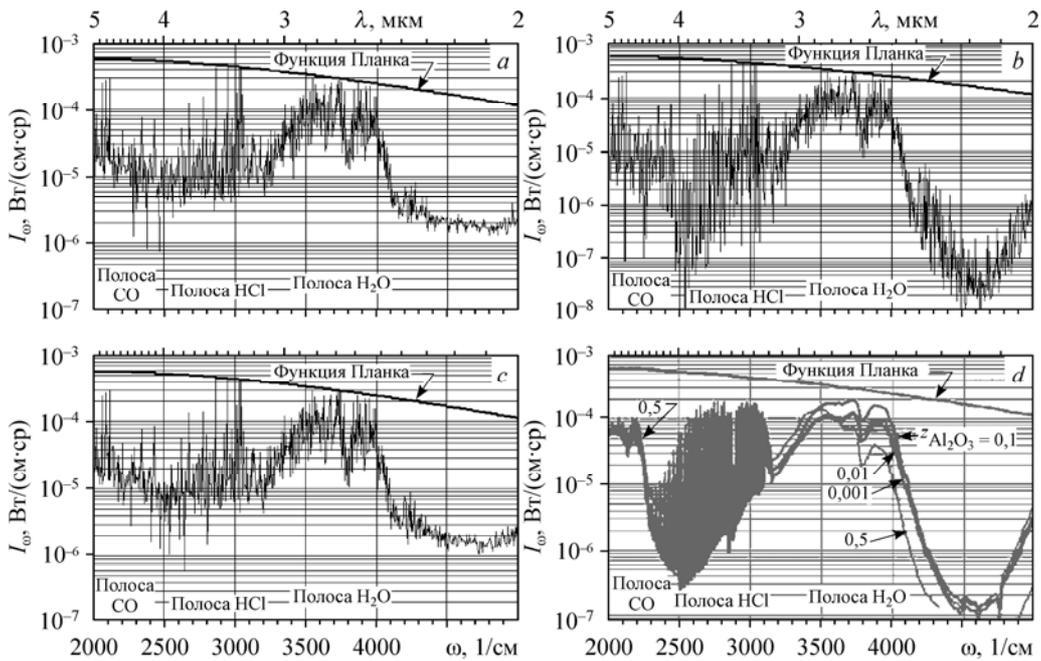


Рис. 4. Спектральная интенсивность излучения I_ω факела НТРМТ.

a, b, c — расчеты по методике настоящей работы при $z = 0,1$ и шаге $\Delta\omega = 5 \text{ см}^{-1}$, показывающие влияние разных исходных данных по n_2 на I и ε :

a — исходные данные по n_2 из работы [16], $I = 0,1169 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$, $\varepsilon = 0,110$,

b — данные по n_2 из работы [17], $I = 0,0982 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$, $\varepsilon = 0,0925$,

c — данные по n_2 из настоящей работы (2), $I = 0,1168 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$, $\varepsilon = 0,1100$,

d — результаты расчетов из работы [15], $I = 0,135 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$, $\varepsilon = 0,127$.

в работе [15]. Это объясняется острой селективностью излучения в рассматриваемом диапазоне таких компонентов газовой фазы, как H_2O , CO и HCl (рис. 3а). Уровень I_ω в области ω от 4000 до 5000 см^{-1} обусловлен влиянием свойств частиц конденсата, определяемых значением величины n_2 . Так как в работе [15] не приводятся используемые значения n_2 , то можно прогнозировать их величину, которая находится между данными работ [1–4, 16] и [17]. Различие в оптических константах оказывает влияние на величины I и ε , не превышающее 37 %.

С использованием собственных данных по оптическим константам (2) дополнительно проведено моделирование излучения факела с шагом по волновому числу $\Delta\omega = 1 \text{ см}^{-1}$ (рис. 5а) и 10 см^{-1} (рис. 5б). При этом отличие с учетом рис. 4с для I и ε составляет до 7 %.

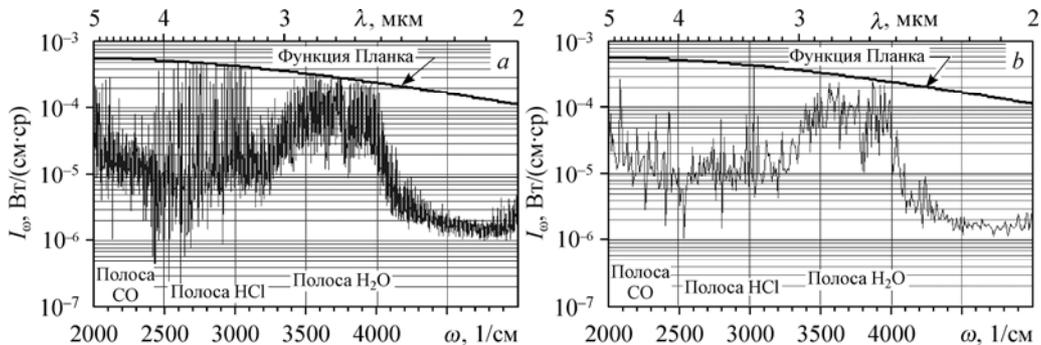


Рис. 5. Спектральная интенсивность излучения I_ω факела НТРМТ.

a — $\Delta\omega = 1 \text{ см}^{-1}$, $I = 0,1105 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$, $\varepsilon = 0,1041$; *b* — $\Delta\omega = 10 \text{ см}^{-1}$, $I = 0,1088 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$, $\varepsilon = 0,1024$.

Проведенное сравнение рассчитанных здесь характеристик излучения, полученных с использованием данных по n_2 из предыдущих работ авторов и работ [16–17], а также соответствующих характеристик из работы [15], позволяют использовать разработанную методику для расчетов радиационных характеристик и характеристик излучения для моделирования теплового излучения ГПС для конкретных энергетических установок.

3. Исходные данные для проведения вычислительного эксперимента. Допущения в расчетной модели

С помощью вычислительного эксперимента исследовались оптические, радиационные характеристики и характеристики излучения ГПС модельного ракетного двигателя. Камера сгорания двигателя имела цилиндрическую форму с диаметром $d_k = 0,26$ м, а диаметр среза сопла составлял $d_c = 0,08$ м. Температура, давление, концентрация компонентов газовой фазы, массовые доли конденсата рассчитывались по методике работы [10]. В таблице представлены расчетные данные для условий факела модельного ракетного двигателя при давлении $p = 10^5$ Па, молярной массе продуктов сгорания $\mu = 0,026$ кг/моль, диаметре струи $L = 0,1$ м.

В расчетной модели рассматривалось изотермическое диаметрально сечение факела вблизи среза сопла, использование которого обосновывалось следующими обстоятельствами:

- усреднением характеристик излучения при определении спектров и температуры по линии визирования спектрометра и радиометра, с которыми сопоставлялись расчетные данные;
- относительно однородным радиальным распределением температуры вблизи среза сопла.

4. Результаты вычислений

С помощью созданной методики были проведены комплексные исследования оптических свойств, РХИЧ, РХЕО и характеристик излучения (плотности потоков и степени черноты) для условий факела.

На первом этапе исследовалась температурная функция и дисперсия комплексного показателя преломления для заданных условий работы модельного ракетного двигателя. Результаты показывают (рис. 6), что в заданном спектральном интервале 0,3–6 мкм показатель преломления n_1 монотонно убывает с ростом длины волны. Отличие результатов для n_1 с ростом температуры от 2600 до 2750 К составляет менее 0,3 %. Показатель

Таблица

Исходные данные для расчета

| Параметры | Опыт I | Опыт II | Опыт III | | | |
|---|--------|---------|----------|-----|-----|-----|
| | | | A | B | C | D |
| Параметр a для $f(r)$, мкм ⁻¹ | 1,6 | 1,6 | 3,0 | 1,6 | 1,6 | 0,8 |
| Параметр b для $f(r)$ | 2,0 | 2,0 | 3,5 | 2,0 | 2,5 | 1,5 |
| Температура частиц $T_{\text{ч}}$, К | 2600 | 2625 | 2750 | | | |
| Массовая доля конденсата z | 0,01 | 0,05 | 0,2 | | | |
| Температура газа $T_{\text{г}}$, К | 2490 | 2500 | 2600 | | | |
| Массовая доля H ₂ O | 0,409 | 0,392 | 0,330 | | | |
| Массовая доля CO | 0,201 | 0,193 | 0,163 | | | |
| Массовая доля CO ₂ | 0,123 | 0,119 | 0,101 | | | |
| Массовая доля O ₂ | 0,018 | 0,017 | 0,014 | | | |
| Массовая доля H ₂ | 0,033 | 0,031 | 0,026 | | | |
| Массовая доля N ₂ | 0,206 | 0,198 | 0,166 | | | |

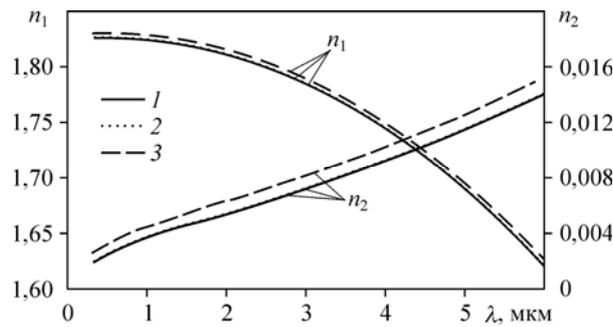


Рис. 6. Оптические свойства n_1 , n_2 частиц конденсата.
 $T = 2600$ (1), 2625 (2), 2750 (3) К.

поглощения n_2 с ростом длины волны возрастает практически линейно и имеет наибольшие значения при $T = 2750$ К. Отличие результатов для n_2 с ростом температуры от 2600 до 2750 К составляет от 8 % ($\lambda = 6$ мкм) до 40 % ($\lambda = 0,3$ мкм).

Основными радиационными характеристиками ГПС являются радиационные характеристики отдельных частиц, поэтому на следующем этапе исследовались РХИЧ при изменении параметров a и b в функции распределения (1). При расчетах для полидисперсных систем частиц осцилляции значений $\sigma_{\text{осл}}$, $\sigma_{\text{погл}}$ и $\sigma_{\text{рас}}$ не наблюдаются, зависимости эффективных сечений изменяются монотонно (рис. 7). Как показывают результаты, для данных систем ослабление проходящего излучения через среду определяется в большей степени эффектами рассеяния, чем поглощения. Так как сечения представляют собой некоторую условную эффективную поверхность, нормальную к пучку лучей, которая характеризует взаимодействие излучения с частицей, то с увеличением модального радиуса частиц r_m (рис. 2) наблюдается увеличение численных значений $\sigma_{\text{осл}}$, $\sigma_{\text{погл}}$ и $\sigma_{\text{рас}}$.

Результаты расчетов РХЕО показывают, что коэффициенты κ_λ , α_λ и β_λ зависят от длины волны и пропорциональны концентрации частиц N (рис. 8). Характер зависимости β_λ от длины волны повторяет характер зависимости $\sigma_{\text{рас}}$ от λ при заданных a и b .

При учете компонентов газовой фазы коэффициенты $\alpha_{T\lambda}$, α_λ и κ_λ имеют основные максимумы в полосах поглощения 1,9, 2,7, 4,3 мкм. Для условий факела излучение носит ярко выраженный селективный характер. Роль газовой фазы возрастает с уменьшением температуры продуктов сгорания и увеличением концентраций основных ее компонентов. Температурная неравновесность частиц конденсата и газовой фазы усиливает роль излучения частиц в окнах прозрачности газовой фазы.

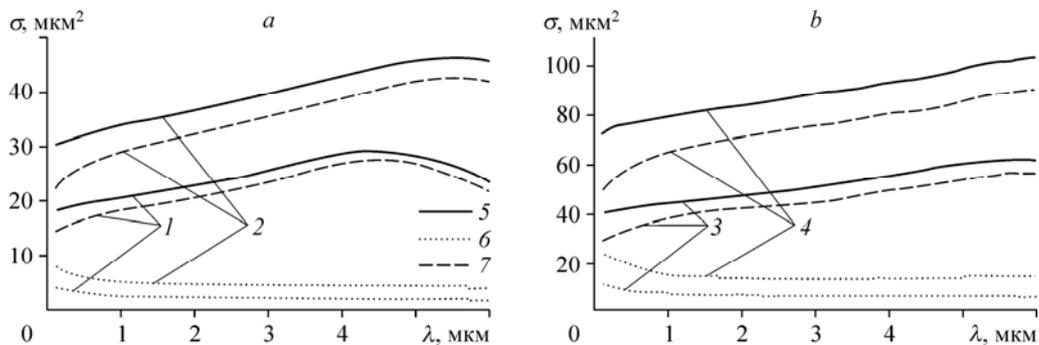


Рис. 7. Радиационные характеристики индивидуальных частиц при заданной функции распределения $f(r)$.

1 — $a = 3,0 \text{ мкм}^{-1}$, $b = 3,5$, 2 — $a = 1,6 \text{ мкм}^{-1}$, $b = 2$, 3 — $a = 1,6 \text{ мкм}^{-1}$, $b = 2,5$, 4 — $a = 0,8 \text{ мкм}^{-1}$, $b = 1,5$,
 5 — $\sigma_{\text{осл}}$, 6 — $\sigma_{\text{погл}}$, 7 — $\sigma_{\text{рас}}$.

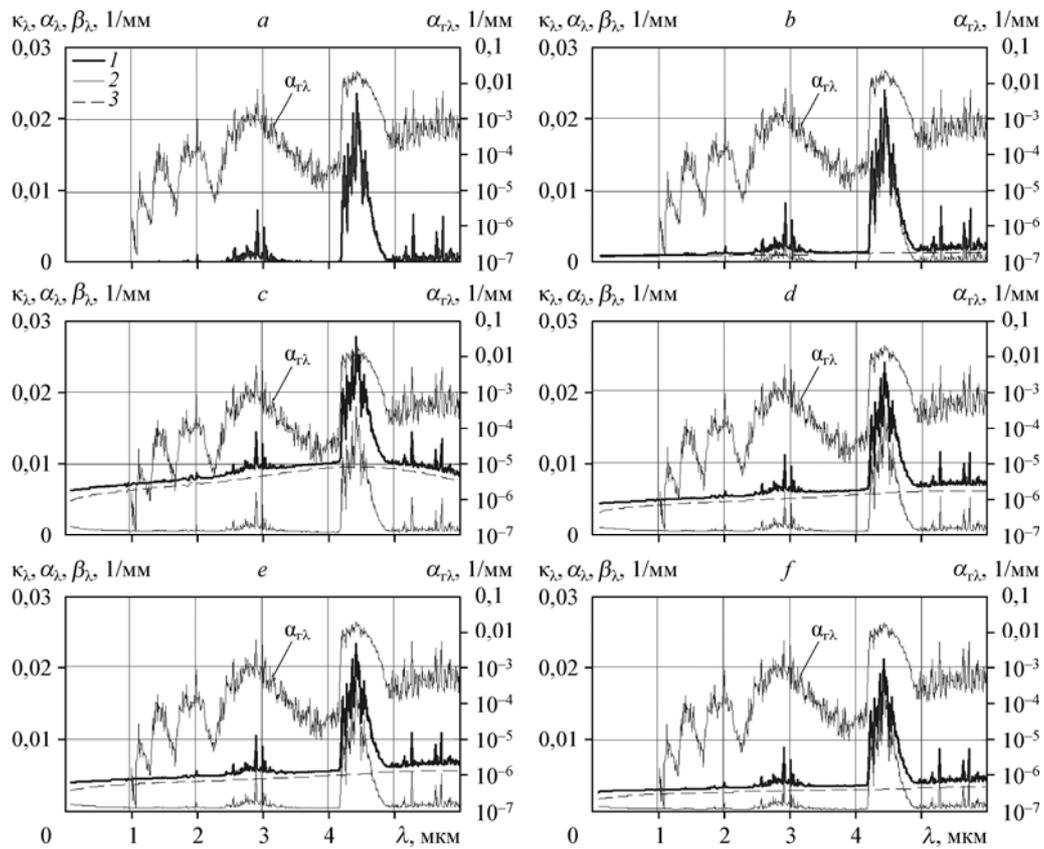


Рис. 8. Радиационные характеристики единичного объема.

a — опыт I: $N = 7,2 \text{ мм}^{-3}$, b — опыт II: $N = 36 \text{ мм}^{-3}$, c — опыт III-A: $N = 353 \text{ мм}^{-3}$,
 d — опыт III-B: $N = 145 \text{ мм}^{-3}$, e — опыт III-C: $N = 101 \text{ мм}^{-3}$, f — опыт III-D: $N = 39,4 \text{ мм}^{-3}$.
 1 — κ_{λ} , 2 — α_{λ} , 3 — β_{λ} .

При фиксированных параметрах a и b (рис. 8а, 8б, 8д) увеличение массовой доли частиц конденсата z от 0,01 до 0,2 приводит к увеличению эффектов рассеяния и соответственно к росту коэффициента рассеяния β_{λ} . Это повышает коэффициент ослабления κ_{λ} . При заданной массовой доле $z = 0,2$ (рис. 8с, 8д, 8е, 8ф) наибольшие значения у коэффициентов κ_{λ} и β_{λ} наблюдаются при параметрах функции $f(r)$ $a = 3 \text{ мкм}^{-1}$, $b = 3,5$, что соответствует наименьшему модальному радиусу частиц r_m .

Экспериментально полученные значения I_{λ} и F_{λ} с помощью спектрометров на срезе сопла свидетельствуют о собственном излучении продуктов сгорания и о рассеянном излучении на частицах конденсата, идущем из камеры сгорания. Собственное излучение ГПС соответствует значениям локальной температуры и может быть привязано к температуре термо- и газодинамических расчетов. Эти условия обычно соответствуют основному участку факела, что дает возможность сопоставлять расчетные и экспериментальные результаты по собственному излучению ГПС. Данные работы [15] приведены для основного участка струи.

Для начального участка струи или факела вблизи среза сопла в расчетных моделях необходимо учитывать помимо собственного рассеянного на частицах конденсата излучение из камеры сгорания со стороны среза сопла. Данный «прожекторный» эффект может исказить характер излучения в рассматриваемой задаче. За счет его действия замеренная интенсивность излучения может превышать интенсивность излучения абсолютно черного тела при локальной температуре струи [1]. Исследование в этом

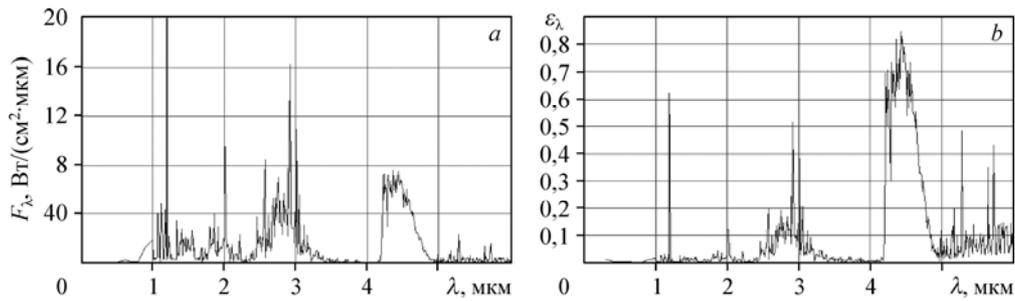


Рис. 9. Характеристики излучения F_λ и ϵ_λ для опыта I, рассчитанные по термо- и газодинамическим параметрам. $F = 8,639 \text{ Вт/см}^2$ (a), $\epsilon = 0,03431$ (b).

направлении представляет собой непростую задачу. Совпадение экспериментального спектра с расчетным при учете «прожекторного» эффекта проверено в работах [1, 18, 19], что подтверждает наличие такого эффекта у реальных двигателей. Анализ выполненных измерений на модельных двигателях [18, 19] показывает, что наблюдается сдвиг максимума излучения в сторону коротких длин волн, что эквивалентно повышению температуры ГПС по сравнению с действительной до 400 К [1].

В настоящем исследовании по методике работы [1] приведены некоторые результаты расчета характеристик излучения (плотностей потоков и степеней черноты) для условий факела с учетом и без учета «прожекторного» эффекта (ПЭ) (рис. 9–11). Для опыта I, соответствующего массовой доле частиц конденсата $z = 0,01$, влияние эффекта составляло порядка 15 %.

Для всех опытов спектральные распределения величин F_λ и ϵ_λ имеют селективный характер. Излучение газовой фазы проявляется в инфракрасной области. Из анализа результатов вычислений по данным термо- и газодинамических расчетов (без учета влияния «прожекторного» эффекта) можно утверждать, что увеличение массовой доли частиц z от 0,01 до 0,2 (при $a = 1,6 \text{ мкм}^{-1}$, $b = 2$) приводит к возрастающей роли излучения частиц конденсата (рис. 9a, 10a — кривая 1, 11c — кривая 1). При этом интегральная плотность потока F возрастает в 3,1 раза, а интегральная степень черноты ϵ — в 2,5 раза. При массовой доле частиц конденсата $z = 0,2$ (рис. 11 — кривая 1) наибольшие значения интегральные величины принимают при параметрах функции $f(r)$ $a = 3 \text{ мкм}^{-1}$, $b = 3,5$ ($F = 30,15 \text{ Вт/см}^2$, $\epsilon = 0,0953$). При увеличении модального радиуса частиц r_m от 1,17 до 1,88 мкм плотность потока излучения уменьшается на 26,5 %, а степень черноты — на 24,5 %.

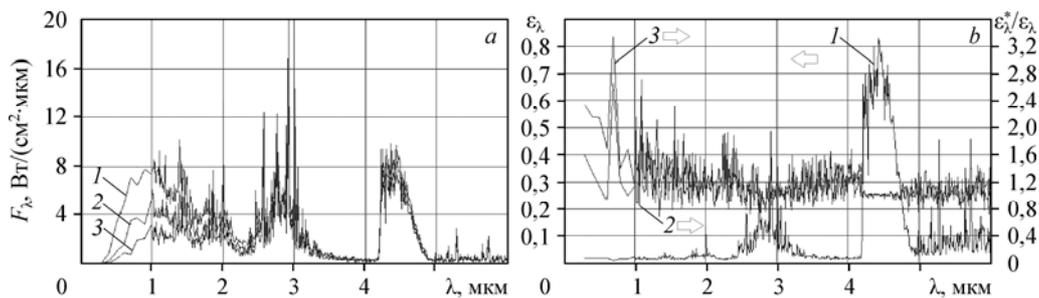


Рис. 10. Характеристики излучения F_λ и ϵ_λ для опыта II.

a: 1 — расчет по термо- и газодинамическим параметрам, 2 — расчет с учетом ПЭ, эквивалентного увеличению T на 7,62 % ($\Delta T = 200 \text{ К}$), 3 — расчет с учетом ПЭ, эквивалентного увеличению T на 15,24 % ($\Delta T = 400 \text{ К}$),
 b: 1 — расчет для ϵ_λ по термо- и газодинамическим параметрам, 2 — отношение степени черноты ϵ^* при учете ПЭ, эквивалентного увеличению T на 7,62 %, к ϵ без учета ПЭ, 3 — отношение степени черноты ϵ^* при учете ПЭ, эквивалентного увеличению T на 15,24 %, к ϵ без учета ПЭ;

$F = 10,20$ (1), 13,62 (2), 18,41 (3) Вт/см^2 , $\epsilon = 0,03896$ (1), 0,03859 (2), 0,03952 (3).

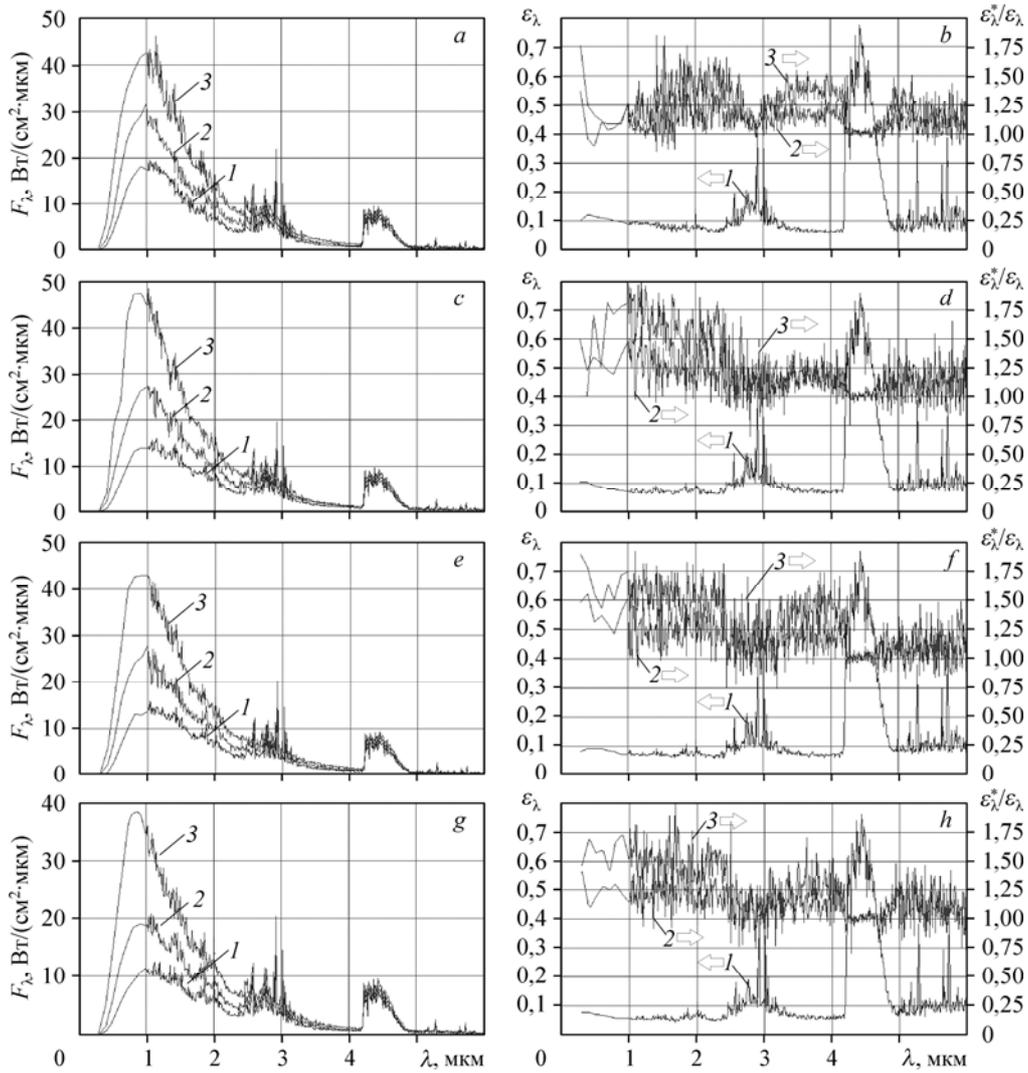


Рис. 11. Характеристики излучения F_λ и ε_λ для опытов III-A (a, b), III-B (c, d), III-C (e, f), III-D (g, h).

a, c, e, g: 1 — расчет по термо- и газодинамическим параметрам, 2 — расчет с учетом ПЭ, эквивалентного увеличению T на 7,27 % ($\Delta T = 200$ K), 3 — расчет с учетом ПЭ, эквивалентного увеличению T на 14,55 % ($\Delta T = 400$ K),

b, d, f, h: 1 — расчет по ε_λ по термо- и газодинамическим параметрам, 2 — отношение степени черноты ε_λ^*

при учете ПЭ, эквивалентного увеличению T на 7,27 % к ε_λ без учета ПЭ, 3 — отношение степени

черноты ε_λ^* при учете ПЭ, эквивалентного увеличению T на 14,55 % к ε_λ без учета ПЭ;

1 — $F = 30,15$ (a), 27,09 (b), 26,74 (c), 22,77 (d) Вт/см², $\varepsilon = 0,09530$ (a), 0,08564 (b), 0,08452 (c), 0,07196 (d);

2 — $F = 43,45$ (a), 41,9 (b), 40,47 (c), 34,31 (d) Вт/см², $\varepsilon = 0,1033$ (a), 0,09958 (b), 0,09620 (c), 0,08155 (d);

3 — $F = 63,44$ (a), 64,82 (b), 61,63 (c), 52,56 (d) Вт/см², $\varepsilon = 0,1156$ (a), 0,1181 (b), 0,1123 (c), 0,9579 (d).

Расчет без учета «пржекторного» эффекта дает заниженные значения спектральной плотности потока (рис. 9a, 10a — кривая 1; 11a, 11c, 11e, 11g — кривые 1).

Для рассматриваемых опытов по закону смещения Вина максимум F_λ сдвигается из-за учета рассеяния излучения из камеры сгорания на $\Delta\lambda = 0,071$ – $0,146$ мкм в сторону коротких длин волн. Для опыта II смещение максимума F_λ на $\Delta\lambda = 0,078$ – $0,146$ мкм эквивалентно увеличению температуры примерно на 7,62–15,24 % ($\Delta T = 200$ – 400 K), что приводит к увеличению F на 33,5–80,5 % и изменению ε на 1–1,4 %. Для опытов III-A–D

смещение максимума F_λ на $\Delta\lambda = 0,071-0,134$ мкм эквивалентно увеличению температуры примерно на 7,27–14,55 % ($\Delta T = 200-400$ К). Для опыта III-A это приводит к увеличению F на 44,1–110,4 % и ε на 8,4–21,3 %, для опыта III-B — к увеличению F на 54,7–139,3 % и ε на 16,3–37,9 %, для опыта III-C — к увеличению F на 51,3–130,5 % и ε на 13,8–32,9 %, для опыта III-D — к увеличению F на 50,7–130,8 % и ε на 13,3–33,1 %.

Поправка ΔT к локальным профилям температуры, обусловленная уровнем излучения факела, зависит от эффекта рассеяния на частицах конденсата излучения из камеры сгорания. Влияние «прожекторного» эффекта возрастает с увеличением массовой доли частиц конденсата и максимально выражено для функции распределения $f(r)$ с параметрами $a = 1,6$ мкм⁻¹, $b = 2$.

Анализ результатов вычислительных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что для условий факела присутствие газовой фазы в продуктах сгорания приводит к селективности излучения, вследствие чего использование серого приближения в расчетах теплового излучения неоправданно.

Разработанная методика вычислительного эксперимента позволяет исследовать влияние факторов, указанных на рис. 1. В настоящей работе исследовано влияние массовой доли, функции распределения частиц по размерам, температуры ГПС и «прожекторного» эффекта на тепловое излучение в факеле модельного ракетного двигателя.

Характеристики излучения ракетных двигателей могут быть полезными для решения проблем селекции (обнаружения и распознавания летательных объектов) и проблем защиты летательных аппаратов ложными тепловыми целями.

Выводы

С помощью проведенных вычислительных экспериментов по комплексному исследованию теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя получены следующие результаты.

1. Определены температурная функция и дисперсия комплексного показателя преломления для заданных условий факела модельного ракетного двигателя.

2. Исследована зависимость радиационных характеристик индивидуальных частиц от длины волны. Для данных систем ослабление проходящего излучения через среду определяется в большей степени эффектами рассеяния, чем поглощения.

3. Исследована зависимость радиационных характеристик единичного объема от длины волны. При учете компонентов газовой фазы коэффициенты $\alpha_{T\lambda}$, α_λ и β_λ имеют основные максимумы в полосах поглощения 1,9, 2,7, 4,3 мкм. При фиксированных параметрах a и b функции распределения $f(r)$ увеличение массовой доли частиц конденсата z приводит к увеличению эффектов рассеяния. При заданной массовой доле частиц конденсата z наибольшие значения у коэффициентов α_λ и β_λ наблюдаются при параметрах функции $f(r)$, соответствующих наименьшему модальному радиусу частиц r_m .

4. Исследована зависимость характеристик излучения от длины волны. Спектральные распределения величин F_λ и ε_λ имеют ярко выраженный селективный характер. Увеличение массовой доли z от 0,01 до 0,2 приводит к возрастающей роли излучения частиц. При этом интегральная плотность потока F возрастает в 3,1 раза, а интегральная степень черноты ε — в 2,5 раза. При массовой доле $z = 0,2$ наибольшие значения интегральные величины принимают при параметрах функции $f(r)$ $a = 3$ мкм⁻¹, $b = 3,5$. При увеличении модального радиуса частиц r_m от 1,17 до 1,88 мкм поток излучения уменьшается на 26,5 %, а степень черноты — на 24,5 %.

5. Сопоставление расчетных значений I_λ , F_λ и ε_λ по термо- и газодинамическим параметрам с экспериментальными данными на срезе сопла может быть корректным

только при учете рассеяния излучения на частицах гетерогенных продуктов сгорания из камеры сгорания. Это обстоятельство необходимо учитывать в расчетных моделях начального участка факела в пределах нескольких калибров. При этом важную роль играет величина массовой доли частиц, концентрация, размеры частиц и оптическая толщина рассеивающего слоя.

Результаты работы позволяют комплексно оценивать процессы теплового излучения в факелах модельных ракетных двигателей (на микро- и макроуровнях). Одновременное вычисление и взаимосвязь оптических свойств, радиационных характеристик и характеристик излучения продуктов сгорания модельных ракетных двигателей позволяет поэтапно оценивать влияние на них определяющих параметров, что создает основу контролируемого на всех этапах и управляемого вычислительного эксперимента с заданными свойствами. Такой подход дает возможность ограничиться результатами в каждом конкретном случае для определенных исследований: в спектроскопии (сечения и коэффициенты), в области теплообмена (плотности потоков и степени черноты), в решении обратных задач (определение функции распределения и оптических констант) и др.

Предполагается использование разработанной методики для других энергоустановок, что потребует для новых условий соответствующих исходных данных по оптическим свойствам, дисперсности конденсированной фазы и термодинамическим параметрам.

Список обозначений

| | |
|--|--|
| a, b — параметры функции $f(r)$ (a в 1/мкм), | P_n — полиномы Лежандра, |
| a_n, b_n — амплитуды парциальных волн (коэффициенты Ми), | p — давление, Па, |
| F_λ и F — спектральная и интегральная плотности потока энергии излучения, Вт/(см ² мкм) и Вт/см ² , | r — координата, радиус частицы, мкм, |
| $f(r)$ — функция распределения частиц по размерам, 1/мкм, | r_m — модальный радиус, мкм, |
| I — интегральная интенсивности излучения, Вт/(см ² ср), | Re — вещественная часть комплексного числа, |
| I_λ — спектральная интенсивности излучения по λ , Вт/(см ² мкм ср), | T — температура, К, |
| I_ω — спектральная интенсивности излучения по ω , Вт/(см ср), | W_q, W_T — скорости частиц и газа, м/с, |
| i_1, i_2 — величины, характеризующие интенсивность рассеяния излучения, поляризованного в направлении перпендикулярном плоскости рассеяния и в плоскости рассеяния соответственно, | z — массовая доля конденсата, |
| $K_{\text{осл}}, K_{\text{рас}}$ — факторы эффективности ослабления и рассеяния, | $\kappa_\lambda, \alpha_\lambda, \beta_\lambda$ — спектральные коэффициенты ослабления поглощения и рассеяния, 1/м, |
| L — толщина излучающего слоя, м, | $\alpha_{\lambda g}$ — спектральный коэффициент поглощения газовой фазы, 1/м, |
| m — комплексный показатель преломления частиц конденсата, | γ_λ — индикатриса рассеяния для единичного объема полидисперсной системы частиц, |
| N — количество частиц в единице объема, 1/м ³ , | γ_0 — индикатриса рассеяния единичной сферической частицы, |
| n_1 и n_2 — показатели преломления и поглощения, | ε_λ и ε — спектральная и интегральная степени черноты, |
| | θ — угол рассеяния, радиан, |
| | λ — длина волны, м, |
| | μ — молярная масса продуктов сгорания, кг/моль, |
| | ρ — параметр дифракции, |
| | ρ_q, ρ_g — плотности частиц и газовой фазы, кг/м ³ , |
| | $\sigma_{\text{осл}}, \sigma_{\text{рас}}$ и $\sigma_{\text{погл}}$ — сечения ослабления, рассеяния и поглощения, м ² , |
| | ω — волновое число, 1/см. |

Список литературы

1. Кузьмин В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. Киров: Полекс, 2004. 231 с.
2. Кузьмин В.А., Заграй И.А. Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок. Германия: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 140 с.
3. Кузьмин В.А., Гребенщиков Л.Т., Панфилович К.Б., Маратканова Е.И., Пятин А.А. Исследование влияния технологической наследственности на тепловое излучение дисперсных систем // Теплообмен-ММФ-1996: III Минский междунар. форум. Т. II Радиационный и комбинированный теплообмен. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова, 1996. С. 49–52.

4. Кузьмин В.А., Заграй И.А. Оптические и радиационные характеристики частиц в продуктах сгорания модельного двигателя // *Мат. XXXI Всерос. конф. «Наука и технологии»*. Миасс: МСНТ, 2011. С. 71–73.
5. Блох А.Г., Клабуков В.Я., Кузьмин В.А. Радиационные характеристики полидисперсных систем сферических частиц. Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1976. 112 с.
6. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 320 с.
7. Кузьмин В.А., Пяткова (Заграй) И.А. Радиационные характеристики частиц двигателей и энергетических установок // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2010. № 3, 4. С. 11–14.
8. Кузьмин В.А., Пяткова (Заграй) И.А. Радиационные характеристики частиц конденсированной фазы гетерогенных продуктов сгорания в энергетических установках // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2010. № 1, 2. С. 14–20.
9. Кузьмин В.А., Маратканова Е.И. Инверсные задачи определения оптических свойств и дисперсности частиц конденсированной фазы гетерогенных продуктов сгорания // *Известия вузов. Авиационная техника*. 1985. № 1. С. 42–47.
10. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П., Худяков В.А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник в 10 т. / Под ред. В.П. Глушко. М.: АН СССР-ВИНИТИ. 1971. Т.1. 266 с.
11. Михайленко С.Н., Бабиков Ю.Л., Головкин В.Ф. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18, № 9. С. 765–776.
12. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A. et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // *J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2009. No.110. P. 533–572.
13. Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A., Perevalov V.I., Tashkun S.A., Tennyson J. HITRAN, the high-temperature molecular spectroscopic database // *J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2010. No. 111. P. 2139–2150.
14. Кузьмин В.А., Маратканова Е.И. Комплексная программа расчета характеристик излучения гетерогенных продуктов сгорания // *Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств*: Тез. докл. Республ. конф. 26–28 мая, 1987, Киев. С. 69–70.
15. Нельсон Х.Ф. Влияние частиц на ИК-излучение выхлопных струй тактической ракеты // *Аэрокосмическая техника*. 1986. № 1. С. 119–127.
16. Пластинин Ю.А., Суржиков С.Т., Хмелинин Б.А. Исследование направленной излучательной способности полидисперсных газопылевых объемов методом Монте-Карло // *Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации*. М.: Наука, 1985. С. 185–186.
17. Лингарт Ю.К., Петров В.А., Тихонова Н.А. Оптические свойства лейкосапфира при высоких температурах. I. Область полупрозрачности. // *Теплофизика высоких температур*. 1982. Т. 20, №5. С. 872–880.
18. Клабуков В.Я., Кришталь В.И., Гребенщиков Л.Т., Маратканова Е.И., Кузьмин В.А., Ивашевский М.А. Экспериментальное исследование рассеяния излучения из камеры сгорания двигателя на частицах конденсата в истекающей струе // *Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по радиационному теплообмену*. Киев: Наукова думка, 1978. С. 121–122.
19. Клабуков В.Я., Гребенщиков Л.Т., Маратканова Е.И., Кришталь В.И., Кузьмин В.А. Экспериментально-теоретическое исследование эффекта рассеяния излучения из камеры сгорания двигателя на частицах конденсата, содержащихся в истекающей струе // *Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов: межвуз. сб.* Казань: КАИ, 1982. С. 64–68.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2014 г.