

УДК 621.454.3:535.233

Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей. Часть 2. Исследование влияния различных факторов для РДТТ

В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова

Вятский государственный университет, Киров

E-mail: zagrayia@yandex.ru, shmakova.natalya@mail.ru

Проведение вычислительных экспериментов в области теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей позволяет отслеживать влияние определяющих факторов на характеристики излучения, что дает возможность планировать, прогнозировать и интерпретировать физический эксперимент. В работе рассмотрено влияние конденсированной фазы (частиц оксида алюминия), газовой фазы и отдельных ее компонентов (H_2O и CO_2) на спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения и излучательные способности на различных участках течения гетерогенных продуктов сгорания модельного ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ). Проведено сравнение характеристик излучения продуктов неполного сгорания и продуктов сгорания для камеры и начального участка факела РДТТ первой ступени Трайдент II (D5). Проведено сопоставление расчетов спектральной силы излучения начального участка факела с результатами других авторов.

Ключевые слова: ракетный двигатель на твердом топливе, тепловое излучение, гетерогенные продукты сгорания, характеристики излучения, плотность потока энергии излучения, излучательная способность.

Введение

Исследование сложных физико-химических процессов, происходящих в ракетных двигателях, с помощью методов численного моделирования позволяет сопоставлять теоретические и экспериментальные результаты с целью определения величин, характеризующих свойства и состояние исследуемой системы.

Реальные условия эксперимента в области теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания (ГПС) и дисперсных систем накладывают ограничения на количество измеряемых параметров ввиду технических возможностей применяемой аппаратуры (разрешение по спектру, диапазон рабочих и измеряемых температур и давлений, др.). В некоторых случаях эксперимент является финансово затратным, труднореализуемым или неосуществимым.

В свою очередь, численное моделирование теплового излучения проводится с рядом допущений в расчетной модели, основные свойства которой должны быть близки

к свойствам исследуемой системы. С учетом этого для отладки методик численного моделирования проводятся наземные стендовые эксперименты на моделях, в том числе с использованием вакуумных камер [1, 2]. В работах [3, 4] исследовалось сходство излучения факела полномасштабной и уменьшенных моделей ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) в наземных условиях. Исследованию теплового излучения ГПС факелов РДТТ были посвящены работы [5–8] и др. Определение сигнатур излучения от факелов ракет-носителей на фоне Земли используется в космических системах для раннего предупреждения и защиты [9, 10], а также для диагностики и контроля рабочего состояния двигателя на наземной наблюдательной платформе [11]. Проведение вычислительных экспериментов позволяет отслеживать влияние определяющих факторов (массовой доли, функции распределения частиц по размерам, температуры продуктов сгорания и т.д.) на тепловое излучение на различных участках течения ГПС РДТТ, что дает возможность планировать, прогнозировать и интерпретировать физический эксперимент [12, 13].

Определение теплового излучения ГПС РДТТ представляет собой непростую вычислительную задачу, т.к. требует учета спектральных особенностей газовой фазы (ГФ) и радиационных характеристик частиц конденсированной фазы (КФ), представляющей собой систему частиц разного размера. По мере движения ГПС по тракту двигателя увеличивается температурная и скоростная неравновесности между ГФ и частицами КФ [14, 15]. Частицы разных размеров имеют разную температуру, следовательно, в элементарном объеме ГПС могут находиться частицы в разных агрегатных состояниях, что оказывает влияние на излучение КФ [15–17].

Углекислый газ CO_2 и водяной пар H_2O являются основными излучающими компонентами ГФ, которые образуются при сжигании твердых ракетных топлив. Излучение этих газов совместно с излучением частиц КФ определяет плотности потоков энергии излучения (ППЭИ) и излучательные способности (ИС) ГПС при работе модельных и натуральных РДТТ.

В экспериментальных исследованиях излучательных свойств CO_2 и H_2O основополагающими являются работы [18, 19], которые используются в инженерной практике расчета радиационного переноса. В работах [20, 21] и др. был собран большой объем данных об излучающих газах, а разработанная в них экспоненциальная широкополосная модель основывалась на аналитических прогнозах поведения линий и полос поглощения в сочетании с экспериментальными измерениями. Более точные современные спектральные модели используют k -распределения с коррелированными и масштабированными коэффициентами поглощения ГФ [22, 23]. Полный обзор разработанных моделей и методов можно найти в работах [24, 25].

В настоящее время широко используется информационная система «Спектроскопия атмосферных газов» [26], предназначенная для моделирования и визуализации молекулярных спектров поглощения атмосферных газов и их смесей. Система включает банки данных HITRAN [27], GEISA [28], HITEMP [29] и др. В основу моделирования положен метод полинейного счета (line-by-line) спектрального поглощения веществ в ГФ через суммирование стандартных контуров поглощения изолированных линий для заданного спектрального диапазона. Коэффициенты поглощения ГФ, необходимые для расчета радиационных тепловых потоков ГПС РДТТ, определялись в представленной работе с помощью указанной системы.

В первой части работы [30] проводилось исследование характера и уровня излучения продуктов сгорания на примере расчета спектральных и интегральных ППЭИ и ИС в камере сгорания, в сопле, на начальном участке факела (НУФ) вблизи среза сопла

и на основном участке факела (ОУФ) для модельных жидкостного ракетного двигателя и РДТТ.

Вторая часть посвящена определению влияния КФ (частиц оксида алюминия), ГФ и отдельных ее компонентов (H_2O и CO_2), а также продуктов неполного сгорания и конечных продуктов сгорания на спектральные и интегральные характеристики излучения для РДТТ.

1. Расчет теплового излучения для модельных и натуральных РДТТ

ГПС РДТТ представляют собой смесь ГФ и КФ, которая преимущественно состоит из частиц оксида алюминия.

Для теоретического определения характеристик теплового излучения (ППЭИ и ИС) для такой среды необходимо найти решение уравнения переноса энергии излучения

$$(\bar{\Omega}\nabla)I_\lambda(\bar{r}, \bar{\Omega}) + k_\lambda I_\lambda(\bar{r}, \bar{\Omega}) = \beta_\lambda \int_{4\pi} I_\lambda(\bar{r}', \bar{\Omega}') \gamma_\lambda(\bar{r}, \bar{r}', \bar{\Omega}, \bar{\Omega}') d\bar{\omega}' + \alpha_\lambda I_{0\lambda}(r)$$

с учетом эффектов поглощения, рассеяния и излучения. Для численного решения уравнения необходимы радиационные характеристики единичного объема продуктов сгорания — спектральные коэффициенты ослабления k_λ , поглощения α_λ , рассеяния β_λ и индикатрисы рассеяния γ_λ .

Для расчета радиационных характеристик КФ требуются данные по оптическим свойствам материала частиц и их дисперсность. Оптические свойства задаются величиной комплексного показателя преломления $m(\lambda, T)$, а дисперсность в общем случае определяется функцией распределения частиц по размерам $f(r)$. Анализ литературных данных [12, 15, 31, 32] показал, что распределение частиц оксида алюминия по размерам для средних и модельных РДТТ описывается гамма-распределением

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

а для натуральных РДТТ — логарифмически-нормальным законом

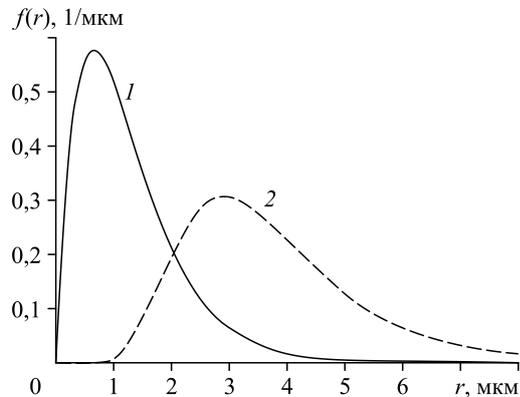
$$f(r) = \frac{1}{r \ln \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right),$$

где r — радиус частиц, параметры a , b , σ , r_0 соответствуют различным условиям процесса и определяются экспериментально. Используемые в работе функции распределения с соответствующими параметрами приведены на рис. 1.

Численное решение уравнения переноса энергии излучения выполнялось методом сферических гармоник в P_3 -приближении для одномерной задачи.

Рис. 1. Функции распределения частиц по размерам $f(r)$ для модельного (1) и натурального (2) РДТТ.

1 — $a = 1,642 \text{ мкм}^{-1}$, $b = 1,11$,
2 — $\sigma = 1,5 \text{ мкм}$, $r_0 = 3,46 \text{ мкм}$.



В результате получены значения спектральных и интегральных ППЭИ (F и F_λ) и ИС (ε и ε_λ) ГПС. Расчеты проводились с учетом радиационных характеристик только КФ (спектральный коэффициент полного ослабления k_λ определяется спектральными коэффициентами рассеяния β_λ и поглощения КФ $\alpha_{z\lambda}$, коэффициент поглощения ГФ $\alpha_{T\lambda}$ равен нулю), а также с учетом радиационных характеристик ГФ ($k_\lambda = \beta_\lambda + \alpha_{z\lambda} + \alpha_{T\lambda}$).

Разработанная авторами методика расчета радиационных характеристик и характеристик излучения [33, 34] позволяет проводить вычисления в широком интервале термодинамических параметров (температуры, давления, состава, массовой доли конденсата), отслеживать влияние различных факторов, в том числе скоростной и температурной неравновесностей на спектры излучения ГПС.

2. Исследование влияния КФ и ГФ на характеристики излучения ГПС модельного РДТТ

Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние КФ (частиц оксида алюминия), ГФ и отдельных ее компонентов (H_2O и CO_2) на спектральные и интегральные характеристики излучения ГПС модельного РДТТ. Рассматривался двигатель, имеющий сопло с углом полураскрытия $\beta = 15^\circ$ и диаметром критического сечения $d_{кр} = 6,8$ мм. Массовая доля частиц Al_2O_3 составляла $z = 0,2$. Распределение частиц по размерам приведено на рис. 1 (кривая 1). ГФ представлена следующими компонентами: $H_2O = 0,330$, $CO_2 = 0,101$, $CO = 0,163$, $O_2 = 0,014$, $H_2 = 0,026$, $N_2 = 0,166$ [30]. Рассматривались характеристики излучения ГПС в спектральном интервале $\lambda = 0,4 - 6$ мкм в камере сгорания, в сопле, на НУФ и ОУФ. Исходные данные для расчета (давление p , температура частиц T_c , температура газа T_g , толщина слоя L) указаны в табл. 1.

На рис. 2 для рассматриваемых участков модельного РДТТ приведены результаты расчета спектральных и интегральных ППЭИ и ИС для полного состава ГПС (КФ + ГФ), при наличии в ГПС только частиц Al_2O_3 (КФ), при наличии в ГПС только ГФ. На рис. 3 приведены результаты расчета спектральных ППЭИ и ИС при наличии в ГПС только одной компоненты ГФ (H_2O или CO_2).

Излучение в камере сгорания определяется в основном излучением частиц КФ и является не только сплошным, но и подобным излучению серого тела в области коротких длин волн. Спектральная ИС ε_λ КФ изменяется в пределах $0,45 - 0,75$ в спектральном интервале $0,4 - 6$ мкм (рис. 2b, кривая 3). Интегральные характеристики излучения при учете КФ (F_z и ε_z) составляют 97,8 % от соответствующих величин для ГПС (F и ε).

Небольшие пики ε_λ для ГПС около $\lambda = 1,4$ и $1,9$ мкм (рис. 2b, кривая 2) вызваны излучением паров воды (рис. 3b, кривая 3). На полосу излучения H_2O $2,5 - 3,2$ мкм частично

Таблица 1
Исходные данные для расчета характеристик излучения ГПС модельного РДТТ

Рассматриваемый участок	Параметры			
	$p, \cdot 10^5$ Па	T_c , К	T_g , К	L , мм
Камера сгорания	40,7	3200	3200	25
Сопло	1,8	2800	2200	20
НУФ	1	2600	2000	25
ОУФ	1	1000	1000	40

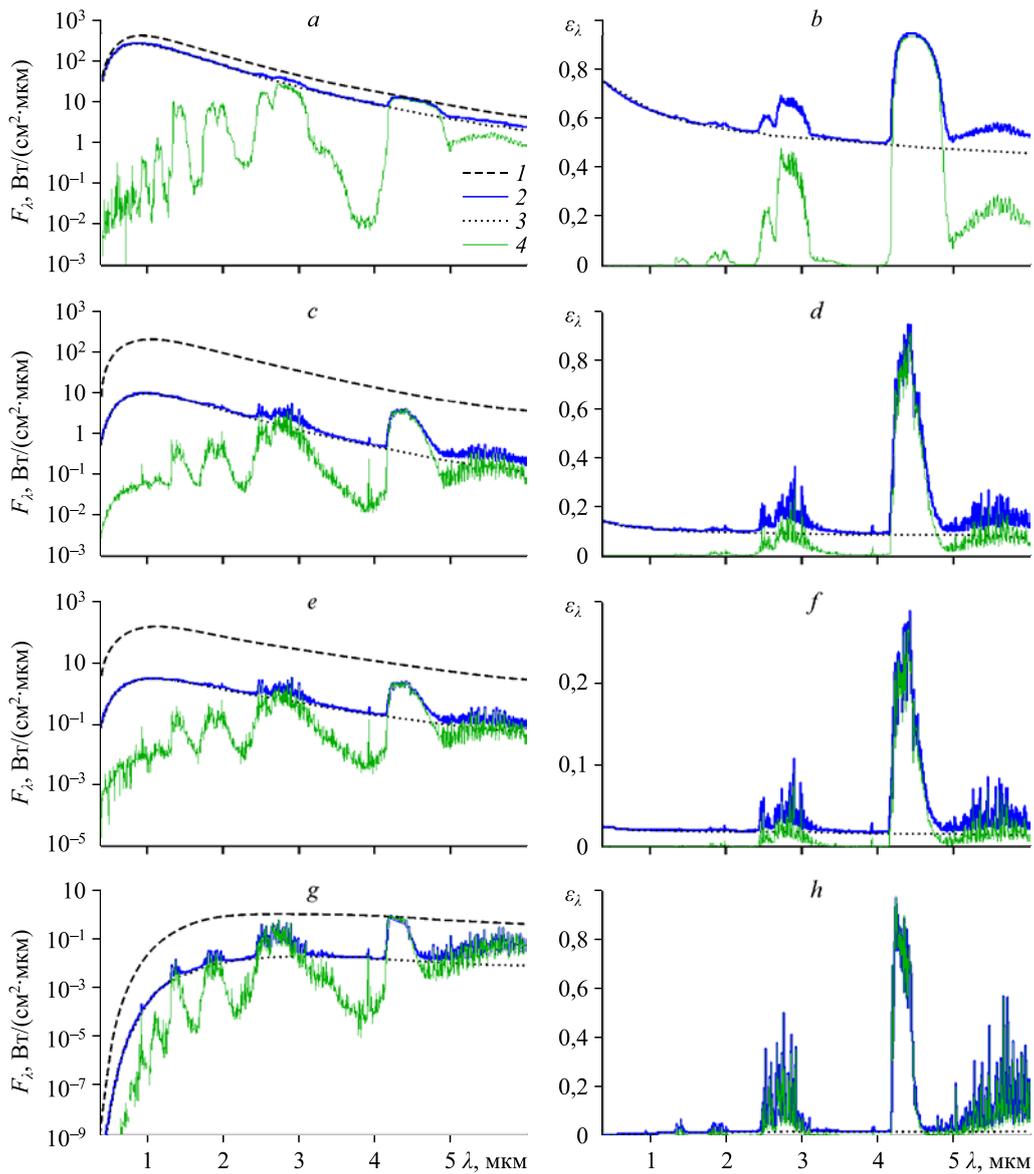


Рис. 2. Спектральная ППЭИ (а, с, е, г) и спектральная ИС (b, d, f, h) ГПС для камеры сгорания (а, b), сопла (с, d), НУФ (е, f), ОУФ (g, h) модельного РДТТ.

- 1 — функция Планка при $T = 3200$ (а), 2800 (с), 2600 (е), 1000 (г) К,
 2 — расчет для ГПС: $F = 363,6$ (а), 16,54 (с), 6,207 (е), 0,3883 (г) Вт/см²,
 $\varepsilon = 0,6241$ (b), 0,0486 (d), 0,0247 (f), 0,0929 (h),
 3 — расчет для КФ: $F = 355,5$ (а), 14,24 (с), 4,969 (е), 0,07 (г) Вт/см²,
 $\varepsilon = 0,6102$ (b), 0,0419 (d), 0,0197 (f), 0,0167 (h),
 4 — расчет для ГФ: $F = 23,14$ (а), 2,533 (с), 1,295 (е), 0,3270 (г) Вт/см²,
 $\varepsilon = 0,0397$ (b), 0,0074 (d), 0,0051 (f), 0,0782 (h).

накладывается излучение CO_2 , что дает результирующее излучение ε_λ до 0,5 в этой полосе (рис. 2b, кривая 4). Главный максимум излучения ГФ находится в полосе 4,2–4,7 мкм (рис. 2a, 2b, кривая 4) и определяется сильной полосой излучения CO_2 (рис. 3a, 3b, кривая 2). При длинах волн, превышающих 5 мкм, определяющее влияние на F_λ и ε_λ оказывают пары воды и частицы КФ (рис. 2a, 2b, кривая 3; рис. 3a, 3b, кривая 3).

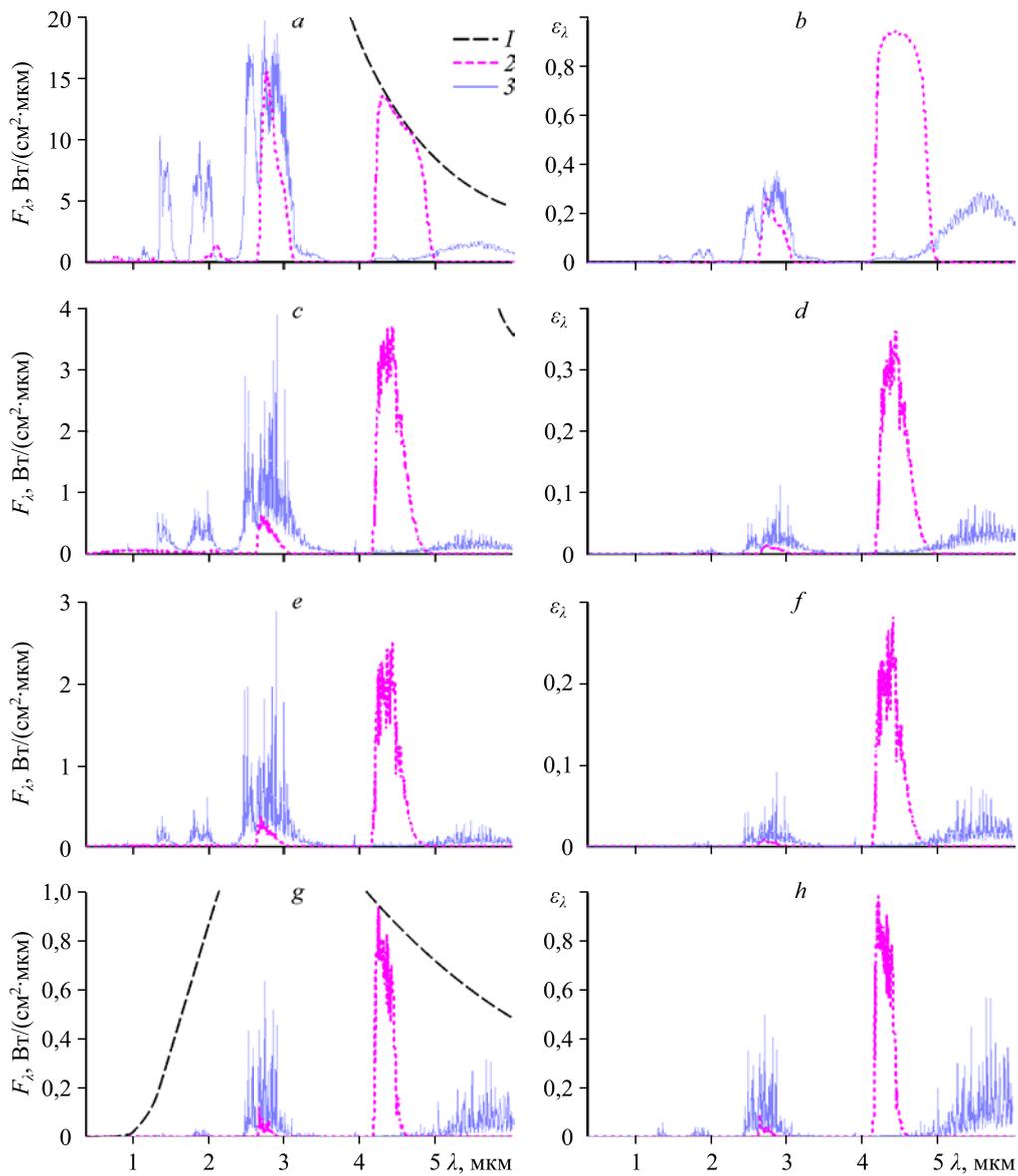


Рис. 3. Спектральная ППЭИ (a, c, e, g) и спектральная ИС (b, d, f, h) газовых компонентов для камеры сгорания (a, b), сопла (c, d), НУФ (e, f), ОУФ (g, h) модельного РДТТ.

1 — функция Планка при $T = 3200$ (a), 2800 (c), 2600 (e), 1000 (g) К,
 2 — расчет для CO_2 : $F = 11,72$ (a), $1,431$ (c), $0,7768$ (e), $0,2002$ (g) Вт/см²,
 $\epsilon = 0,0201$ (b), $0,0042$ (d), $0,0031$ (f), $0,0479$ (h),
 3 — расчет для H_2O : $F = 12,81$ (a), $1,191$ (c), $0,5488$ (e), $0,1292$ (g) Вт/см²,
 $\epsilon = 0,022$ (b), $0,0035$ (d), $0,0022$ (f), $0,0309$ (h).

С уменьшением температуры и давления ГПС в сопле излучение на НУФ и ОУФ приобретает все более выраженный селективный характер. При переходе от камеры к ОУФ все отчетливее проявляется и становится доминирующим излучение ГФ. Интегральные характеристики излучения ГФ (F_{Γ} и ϵ_{Γ}) составляют 6,4 % (камера сгорания), 15 % (сопло), 21 % (НУФ) и 84 % (ОУФ) от соответствующих величин (F и ϵ) для ГПС.

Излучающие компоненты ГФ H_2O и CO_2 вносят основной вклад в излучение ГПС вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм (рис. 3, кривые 2 и 3). С уменьшением температуры и давления ГПС (при переходе от камеры к ОУФ) ширина основной полосы излучения CO_2 (вблизи 4,3 мкм) уменьшается. Наибольшие значения ε_λ для ГФ (до 0,95) вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм наблюдаются для условий камеры сгорания и ОУФ (кривая 4 на рис. 2a, 2b, 2g, 2h), для которых характерна тепловая равновесность частиц и газового потока ($T_\text{ч} = T_\text{г}$). Невысокий уровень ε_λ для ГФ (до 0,37) вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм для условий сопла и НУФ (кривая 4 на рис. 2c, 2d, 2e, 2f) объясняется наличием температурной неравновесности между газом и частицами ($\Delta T = 600$ К). Вследствие температурной неравновесности радиационные характеристики частиц КФ (β_λ , $\alpha_{z\lambda}$) и ГФ ($\alpha_{\tau\lambda}$) соответствуют разным температурам, а суммарный коэффициент ослабления определяется как $k_\lambda(T_\text{ч}, T_\text{г}) = \beta_\lambda(T_\text{ч}) + \alpha_{z\lambda}(T_\text{ч}) + \alpha_{\tau\lambda}(T_\text{г})$. Более подробную информацию по влиянию температурной неравновесности на спектральные и интегральные ППЭИ и ИС для РДТТ можно найти в предыдущих работах авторов [14, 30].

Из рис. 3 (кривая 2) видно, что излучение CO_2 сосредоточено в двух узких полосах спектра (вблизи $\lambda = 2,7$ и 4,3 мкм), в то время как полосы H_2O практически заполняют всю рассматриваемую область спектра ($\lambda = 0,4 - 6$ мкм), существенную для процессов теплового излучения в РДТТ. На рис. 3 видно перекрытие полос поглощения H_2O и CO_2 , вследствие которого излучение одного газа частично поглощается другим. Это приводит к снижению общей ИС смеси газов. В камере сгорания наблюдается примерно соизмеримое влияние компонентов H_2O и CO_2 (12,81 и 11,72 Вт/см² соответственно) на итоговое излучение ГФ. При постепенном переходе по тракту РДТТ влияние CO_2 становится преобладающим, и на ОУФ излучение CO_2 более чем в 1,5 раза превышает излучение H_2O . Таким образом, из анализа результатов можно увидеть влияние КФ, ГФ и ее отдельных компонентов на ППЭИ и ИС в различных участках спектра по тракту движения ГПС (камера сгорания, сопло, НУФ, ОУФ).

3. Исследование характеристик излучения продуктов неполного сгорания и продуктов сгорания на примере МБР «Трайидент II (D5)»

В камере сгорания и в факеле РДТТ находятся продукты неполного сгорания — химические соединения, образующиеся в процессе горения ракетного топлива. Эти промежуточные продукты реакции не являются конечными продуктами ввиду незавершенности процесса пиролиза при неполном (частичном) окислении горючего. Поэтому спектральные и интегральные ППЭИ и ИС, рассчитанные для продуктов неполного сгорания, могут значительно отличаться от соответствующих величин для конечных продуктов сгорания.

С помощью вычислительного эксперимента определим отличие результатов, когда в камере РДТТ находятся продукты неполного сгорания топлива и когда там присутствуют конечные продукты сгорания. Для этого воспользуемся результатами работ [3, 4] для полномасштабной модели РДТТ первой ступени межконтинентальной баллистической ракеты «Трайидент II (D5)» с условиями в камере сгорания и на НУФ, приведенными в табл. 2. В ракетном двигателе используется композитное топливо с массовым содержанием алюминия 10 %. Функция распределения частиц Al_2O_3 по размерам представлена кривой 2 на рис. 1.

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета характеристик излучения для «Трайидент II (D5)»

Параметры	Камера сгорания		НУФ	
$p, \cdot 10^5$ Па	90		1	
T, K	3750		2100	
$L, мм$	2000		1200	
Содержание газовых компонентов (молярная доля)	Продукты неполного сгорания	Продукты сгорания	Продукты неполного сгорания	Продукты сгорания
H ₂ O	0,0008	0,2038	0,18	0,233
CO	0,027	–	0,27	–
CO ₂	0,146	0,188	0,04	0,464
H ₂	0,299	–	–	–
ОН	0,192	–	0,05	–
HCl	–	–	0,05	0,05
$F, Вт/см^2$	1043	1043	45,88	50,12
ε	0,9523	0,9523	0,4374	0,4778

Расчеты спектральных ППЭИ и ИС для продуктов неполного сгорания и продуктов сгорания выполнялись для условий камеры сгорания (рис. 4а, 4б) и НУФ (рис. 4с, 4д). Для камеры сгорания допущение о наличии только продуктов сгорания (рис. 4а, 4б) справедливо при учете интегральных характеристик. Различие в спектральных величинах не превышает 1 % (рис. 4б). Для условий НУФ различие в интегральных характеристиках составляет 9,2 %. Учет конечных продуктов сгорания может как повышать, так и понижать спектральную ИС в зависимости от выбранного спектрального интервала. Максимальное отличие ε_{λ}^* (продукты сгорания) от ε_{λ} (продукты неполного сгорания) может составлять до 60 % (вблизи длин волн $\lambda = 2,7, 4,8$ и 5 мкм) (рис. 4д).

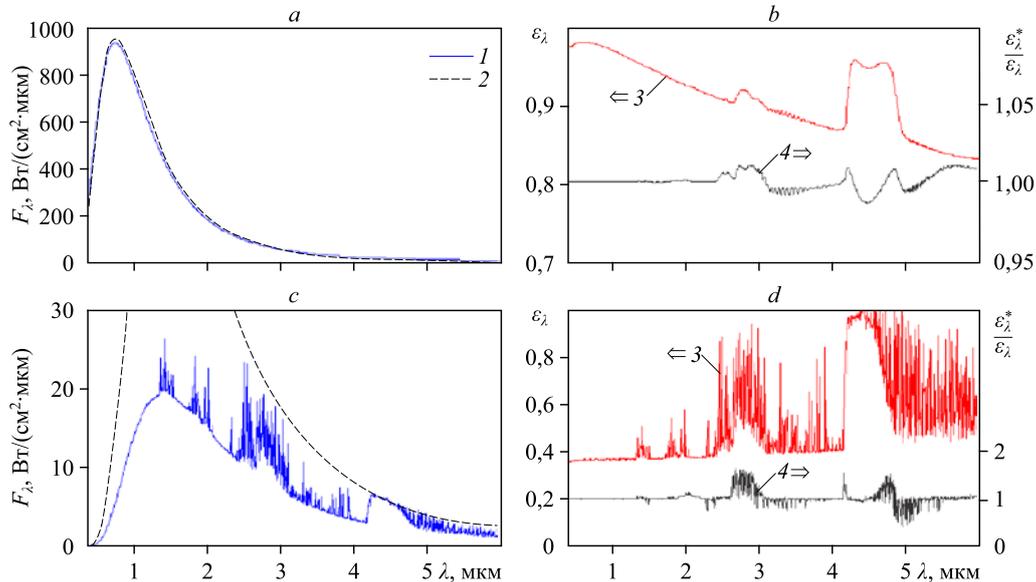


Рис. 4. Спектральная ППЭИ (а, с) и спектральная ИС (б, д) ГПС для камеры сгорания (а, б) и НУФ (с, д) РДТТ «Трайидент II (D5)».

1 — ППЭИ продуктов неполного сгорания, 2 — функция Планка при $T = 3750$ (а), 2100 (с) К,
 3 — ИС ε_{λ} продуктов неполного сгорания,
 4 — отношение ИС ε_{λ}^* продуктов сгорания к ИС ε_{λ} продуктов неполного сгорания.

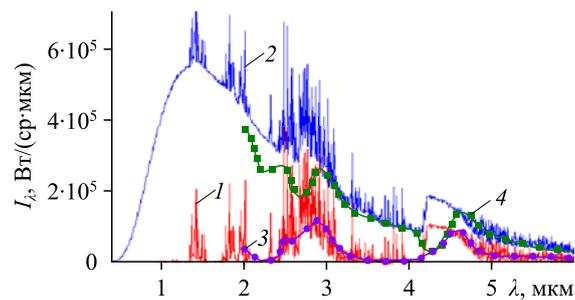


Рис. 5. Спектральная сила излучения факела РДТТ «Трайидент II (D5)».

- 1 — расчет по методике настоящей работы при наличии только ГФ,
 2 — расчет по методике настоящей работы при учете ГФ и КФ,
 3 — результаты расчетов работы [3] при наличии только ГФ,
 4 — результаты расчетов работы [3] при учете ГФ и КФ.

По методике представленной работы проведены расчеты спектральной силы излучения I_λ для НУФ первой ступени МБР «Трайидент II (D5)». Результаты расчетов приведены для условий, представленных в табл. 2 (НУФ, продукты неполного сгорания). Выполненные вычисления спектральной силы излучения (поперечное направление наблюдения) сравниваются с результатами работы [3] и показаны на рис. 5. Основное поведение кривых I_λ удовлетворительно согласуется с результатами [3].

Заключение

1. Установлено влияние КФ на спектральные и интегральные ППЭИ и ИС ГПС модельного РДТТ в камере сгорания, сопле, НУФ и ОУФ. Для камеры сгорания излучение частиц КФ является определяющим. При этом интегральные характеристики излучения при учете КФ (F_z и ε_z) составляют 97,8 % от соответствующих величин для ГПС (F и ε). По мере движения ГПС по тракту роль КФ снижается, и ее влияние на интегральные величины составляет 18 % для ОУФ.

2. Установлено влияние ГФ и отдельных ее компонентов (H_2O и CO_2) на спектральные и интегральные ППЭИ и ИС ГПС модельного РДТТ в камере сгорания, сопле, на НУФ и ОУФ. В условиях камеры сгорания излучение ГФ подавляется излучением частиц, но остается заметным вблизи длин волн 1,4, 1,9 и 4,3 мкм. С уменьшением температуры и давления ГПС в сопле, на НУФ и ОУФ излучение все больше носит ярко выраженный селективный характер. Интегральные характеристики излучения ГФ (F_r и ε_r) составляют 6,4 % (камера сгорания), 15 % (сопло), 21 % (НУФ) и 84 % (ОУФ) от соответствующих величин (F и ε) для ГПС. Основные излучающие компоненты ГФ — H_2O и CO_2 — вносят основной вклад в излучение ГПС вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм. В камере сгорания наблюдается примерно соизмеримое влияние компонентов H_2O и CO_2 (12,81 и 11,72 Вт/см² соответственно) на итоговое излучение ГФ. При постепенном переходе по тракту РДТТ влияние CO_2 становится преобладающим, и на ОУФ излучение CO_2 более чем в 1,5 раза превышает излучение H_2O .

3. Исследованы характеристики излучения продуктов неполного сгорания и продуктов сгорания в камере и на НУФ натурного РДТТ Трайидент II (D5). Для условий камеры сгорания при учете интегральных характеристик справедливо допущение о наличии только продуктов сгорания. Для условий НУФ различие в расчетах интегральных характеристик составляет 9,2 %. В зависимости от выбранного спектрального интервала

спектральные величины могут отличаться до 1 % для камеры сгорания и до 60 % для НУФ (вблизи длин волн $\lambda = 2,7, 4,8$ и 5 мкм).

4. Проведено сравнение результатов настоящей работы с расчетными данными спектральной силы излучения НУФ первой ступени МБР «Трайидент II (D5)».

Список литературы

1. Андреев Е.П., Завелевич Ф.С., Макаров И.П. Сравнение результатов расчета ИК-излучения факела с экспериментальными данными, полученными в вакуумной камере // Оптический журнал. 1998. Т. 65, № 11. С. 34–36.
2. Травников Р.И., Попов Н.А. Метод и аппаратура оптической диагностики факела ракетного двигателя при стендовых испытаниях // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. Вып. 51. 8 с.
3. Zhang X., Chen H. Numerical study on similarity of plume infrared radiation between reduced-scale solid rocket motors // Chinese J. Aeronautics. 2016. Vol. 29, No. 4. P. 924–933.
4. Zhang X., Li R. Numerical study on similarity of plume's infrared radiation from reduced scaling solid rocket // J. Appl. Math. 2015. P. 627351-1–627351-11.
5. Niu Q., Fu D., Dong S., Tan H. A simplified model for fast estimating infrared thermal radiation of low-altitude under-expanded exhaust plumes // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 136. P. 276–287.
6. Нельсон Х.Ф. Оценка неопределенности расчета ИК-излучения факела ракеты // Аэрокосмическая техника. 1988. № 10. С. 161–168.
7. Домбровский Л.А. Расчетное исследование радиационного теплообмена при двухфазном течении в сверхзвуковом сопле // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, № 2. С. 261–268.
8. Тиранов А.Д., Филиппов В.Л. Расчет спектральной плотности силы излучения факелов ракетных двигателей на твердом топливе // Оптический журнал. 2012. Т. 79, № 3. С. 77–83.
9. Chaplain C.T., Gallegos A., Cherveney M., Guarneros B., Swierczek B., Tran H., Trevino O., Weir A. Space acquisitions: space based infrared system could benefit from technology insertion planning. U.S. Government Accountability Office, Washington DC, 2015.
10. Page J.T. America's space sentinels: The history of the DSP and SBIRS satellite systems // J. Air Space Power. 2014. Vol. 28, No. 5. P. 146–150.
11. Mehta M., Gaddy D.E., Danehy P.M., Inman J.A., Burns R.A., Parker R., Dufrene A. Optical diagnostic imaging of multi-rocket plume-induced base flow environments // 47th AIAA Fluid Dynamics Conference, Denver, Colorado. 2017. 17 p.
12. Кузьмин В.А., Маратканова Е.И., Заграй И.А., Рукавишников Р.В. Моделирование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания в камере сгорания модельного двигателя // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 92–97.
13. Кузьмин В.А., Маратканова Е.И., Заграй И.А., Рукавишников Р.В. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания на срезе сопла ракетного микродвигателя // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 124–130.
14. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И. Характеристики теплового излучения факела модельного ракетного двигателя на твердом топливе с учетом скоростной и температурной неравновесностей газа и частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 1. С. 75–84.
15. Вафин Д.Б. Расчет излучения осесимметричных двухфазных сред с температурной неравновесностью фаз // Вест. КГТУ им. А.Н. Туполева. 2009. № 1. С. 18–22.
16. Бабук В.А., Будный Н.Л., Ивоненко А.Н., Низяев А.А. Моделирование характеристик конденсированных продуктов в камере сгорания // Физика горения и взрыва. 2018. № 3. С. 55–63.
17. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990. 368 с.
18. Hottel H.C. Radiant heat transmission. Chapter 4 // Heat Transmission / Ed. W.H. McAdams. 3rd edn. N. Y.: McGraw-Hill, 1954. 822 p.
19. Hottel H.C., Sarofim A.F. Radiative transfer. N. Y.: McGraw-Hill, 1967. 52 p.
20. Edwards D.K., Nelson K.E. Rapid calculation of radiant energy transfer between nongray walls and isothermal H₂O or CO₂ gas // ASME J. Heat Transfer. 1962. Vol. 84, No. 4. P. 273–278.
21. Edwards D.K. Molecular gas band radiation // Advances in Heat Transfer. 1976. Vol. 12. P. 115–193.
22. Wang C., Modest M.F., He B. Improvement of full-spectrum *k*-distribution method using quadrature transformation // Intern. J. Thermal Sci. 2016. Vol. 108. P. 100–107.
23. Zheng S., Sui R., Yang Y., Sun Y., Zhou H., Lu Q. An improved full-spectrum correlated-*k*-distribution model for non-gray radiative heat transfer in combustion gas mixtures // Intern. Communications in Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 114. Art. 104566.

24. **Modest M.F.** The treatment of nongray properties in radiative heat transfer: From past to present // ASME J. Heat Transfer. 2013. Vol. 135, No. 6. P. 061801-1–061801-12.
25. **Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R.** Thermal radiation heat transfer. 6th ed. USA, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2016. 1006 p.
26. **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.
27. **Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Bernath P.F. et al.** The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database // J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2017. No. 203. P. 3–69.
28. **Jacquinet-Husson N., Armante R., Scott N.A., Chedin A., Crepeau L., Boutammine C., Bouhdaoui A. et al.** The 2015 edition of the GEISA spectroscopic database // J. Molecular Spectroscopy. 2016. No. 327. P. 31–72.
29. **Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A., Perevalov V.I., Tashkun S.A., Tennyson J.** HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database // J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2010. No. 111. P. 2139–2150.
30. **Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шамакова Н.А.** Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей. Часть 1. Исследование характера и уровня излучения для модельных ЖРД и РДТТ // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 3. С. 451–460.
31. **Глазунов А.А., Дьяченко Н.Н., Дьяченко Л.И.** Численное исследование течения ультрадисперсных частиц оксида алюминия в сопле ракетного двигателя твердого топлива // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 1. С. 81–88.
32. **Блох А.Г., Клабуков В.Я., Кузьмин В.А.** Радиационные характеристики полидисперсных систем сферических частиц. Горький: Волго-Вятское книж. изд-во, 1976. 112 с.
33. **Кузьмин В.А., Маратканова Е.И., Заграй И.А., Рукавишников П.В.** Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 385–400.
34. **Kuzmin V.A., Maratkanova E.I., Zagrai I.A.** Modeling of thermal radiation of heterogeneous combustion products in the model solid rocket engine plume // Procedia Engng. 2017. Vol. 206. P. 1801–1807.

*Статья поступила в редакцию 23 апреля 2022 г.,
после доработки — 18 мая 2022 г.,
принята к публикации 17 июня 2022 г.*