

УДК 621.454.2/3:535.233

Характеристики теплового излучения продуктов сгорания ракетных двигателей Часть 1. Исследование характера и уровня излучения для модельных ЖРД и РДТТ

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

Вятский государственный университет, Киров

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

В работе приводятся расчетные спектральные плотности потоков энергии излучения и излучательные способности продуктов сгорания модельных жидкостного ракетного двигателя и ракетного двигателя на твердом топливе для условий камеры сгорания, сопла, начального и основного участков факела. Исследовано влияние температурной неравномерности газа и частиц конденсированной фазы на спектральные и интегральные характеристики излучения продуктов сгорания. Проведено сопоставление полученных в работе расчетных результатов с экспериментальными и расчетными данными других авторов. Особое внимание уделяется изучению характера и уровня излучения для разных участков истекающих продуктов сгорания. Результаты работы могут быть полезны при выборе участка спектра для определения температуры продуктов сгорания пирометрическими методами.

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

Введение

Исследования спектральных и интегральных характеристик излучения продуктов сгорания (ПС) ракетных двигателей по тракту «камера сгорания – сопло – начальный и основной участки факела» представляют научный и практический интерес при решении ряда важнейших задач и проблем:

— результаты исследований спектральных и интегральных плотностей потоков энергии излучения (ППЭИ) и излучательных способностей (степеней черноты) на каждом участке тракта позволяют обоснованно выбрать спектральный интервал при определении температуры ПС с помощью пирометров и тепловизоров и корректно рассчитывать излучательную способность, необходимую для проведения измерений;

— результаты исследований ППЭИ и излучательной способности позволяют определить полноту сгорания жидких и твердых топлив в пределах камеры сгорания и сопла по анализу и корректной интерпретации экспериментальных результатов по характеристикам излучения за пределами среза сопла;

© Кузьмин В.А., Заграй И.А., Шмакова Н.А., 2022

- способствуют обоснованному подбору спектрального интервала, уровня и характера излучения при разработке тепловых ловушек по защите летательных аппаратов от зенитно-ракетных комплексов;

- позволяют корректно рассчитывать сигнатуры факелов ракет при решении проблем селекции и наведения зенитно-ракетного комплекса;

- дают возможность определять радиационные тепловые потоки для защиты элементов конструкции летательного аппарата.

Для отладки методик моделирования и решения указанных проблем проводятся наземные стендовые эксперименты на моделях, в том числе с использованием вакуумных камер [1, 2]. Наряду с физическим экспериментом, находит широкое распространение математический эксперимент, применяемый для моделирования различных процессов: газодинамики двухфазных течений ПС в сопле и факеле [3–5], ИК-излучения факелов ракетных двигателей [6–10] и др.

Математическое моделирование процесса теплового излучения ПС позволяет существенно снизить сроки и затраты на проведение дорогостоящего, труднореализуемого, а порой неосуществимого физического эксперимента. Кроме того, математическое моделирование процесса теплового излучения ПС позволяет исследовать спектральные характеристики излучения (интенсивности, силы излучения, ППЭИ, излучательные способности), необходимые для решения практических задач.

При проведении разного рода расчетных и экспериментальных исследований теплового излучения ПС необходимо учитывать не только радиационные характеристики газовой и конденсированной фаз [10–13], но и принимать во внимание присутствующие в потоках скоростную и температурную неравновесности [5, 14–20]. По мере движения ПС по тракту двигателя увеличиваются температурная и скоростная неравновесности между газовой фазой и частицами конденсата. Кроме того, частицы разных размеров могут иметь разную температуру и находиться в разных агрегатных состояниях [21].

Настоящая работа направлена на математическое моделирование процесса теплового излучения ПС ракетных двигателей. В первой части статьи проводится исследование характера и уровня излучения ПС на примере расчета спектральных и интегральных плотностей потоков и излучательных способностей в камере сгорания, сопле, на начальном участке факела (НУФ) вблизи среза сопла и на основном участке факела (ОУФ) модельных жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) и ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ). Во второй части будет рассматриваться влияние конденсированной фазы, отдельных компонентов газовой фазы, а также продуктов неполного сгорания и конечных продуктов сгорания на спектральные и интегральные характеристики излучения для РДТТ.

1. Методика расчета характеристик теплового излучения

Все проведенные расчеты выполнены с помощью разработанной методики комплексного исследования теплового излучения гетерогенных ПС [22, 23]. На ее основе создан программный комплекс «Спектр», состоящий из нескольких блоков.

В блоке расчета коэффициентов поглощения газовой фазы используются базы данных Hitemp, Nitran и др., представленные в информационно-вычислительной системе Spectra (<http://spectra.iao.ru>) [24]. Спектральные коэффициенты поглощения смеси вычисляются методом полинейного счета, при этом исходными данными являются химический состав и массовые доли компонентов газовой фазы, температура, давление и длина волны излучения.

В основе блока расчета коэффициентов поглощения, рассеяния, индикатрис рассеяния лежит теория Ми, где в качестве исходных данных используется химический состав частиц конденсированной фазы, их дисперсность, комплексный показатель преломления частиц, температура и длина волны излучения.

В блоке основной программы, базирующемся на алгоритме решения интегродифференциального уравнения методом сферических гармоник в P_3 -приближении для излучающей, поглощающей и рассеивающей среды, используются радиационные характеристики газовой и конденсированной фаз. Результатами расчета этого блока являются спектральные и интегральные ППЭИ (F_λ и F) и излучательные способности (ε_λ и ε). В заключительном блоке результаты представляются в табличном и графическом виде.

Исходные данные по химическому составу, давлению и температуре ПС для ЖРД и РДТТ определялись по программе термодинамического расчета ПС ракетных двигателей, составленной на кафедре ракетных двигателей КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева под руководством академика В.Е. Алемасова.

2. Исследование характеристик излучения модельного ЖРД

Модельный ЖРД, работающий на жидком этилене (окислитель — кислород), представлял собой уменьшенную копию ЖРД F1 [25]. Истечение струи факела происходило в вакуумную камеру. Инфракрасное излучение ПС определялось газами CO_2 и H_2O с массовыми долями 0,725 и 0,275 соответственно. В спектральном интервале $\lambda = 0,4 - 6$ мкм рассчитывались характеристики излучения ПС в камере сгорания, в сопле, на НУФ и ОУФ. Исходные данные для проведения вычислительного эксперимента представлены в табл. 1. Схема модельного ЖРД с обозначением исследуемых объемов изображена на рис. 1. На рис. 2 приведены результаты расчетов спектральной ППЭИ и спектральной излучательной способности на каждом исследуемом участке.

По рис. 2 можно проследить, как меняется (эволюционирует) спектр излучения ПС от камеры сгорания до факела в зависимости от температуры и давления для выбранного спектрального интервала. Спектр излучения гомогенных ПС ЖРД является селективным за счет сильных полос излучения газовых компонентов. При уменьшении температуры и давления происходит сужение основных полос излучения газовых компонентов вблизи длин волн 2, 2,7, 4,3 мкм. Уровень спектральной плотности потока F_λ в этих полосах понижается при переходе от камеры сгорания до факела. Спектральная степень черноты ε_λ вблизи полосы 4,3 мкм, определяемой излучением молекул CO_2 , остается стабильно высокой на уровне 0,8–1 вне зависимости от уровня температур и давлений ПС. С уменьшением

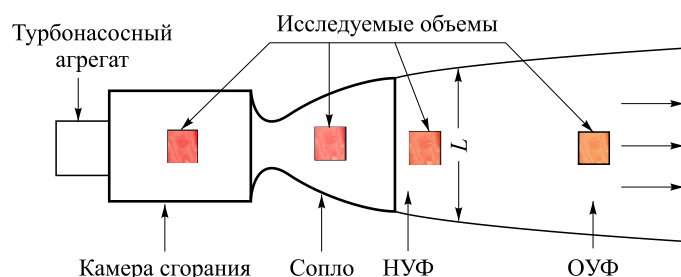


Рис. 1. Схема модельного ЖРД с обозначением исследуемых объемов.

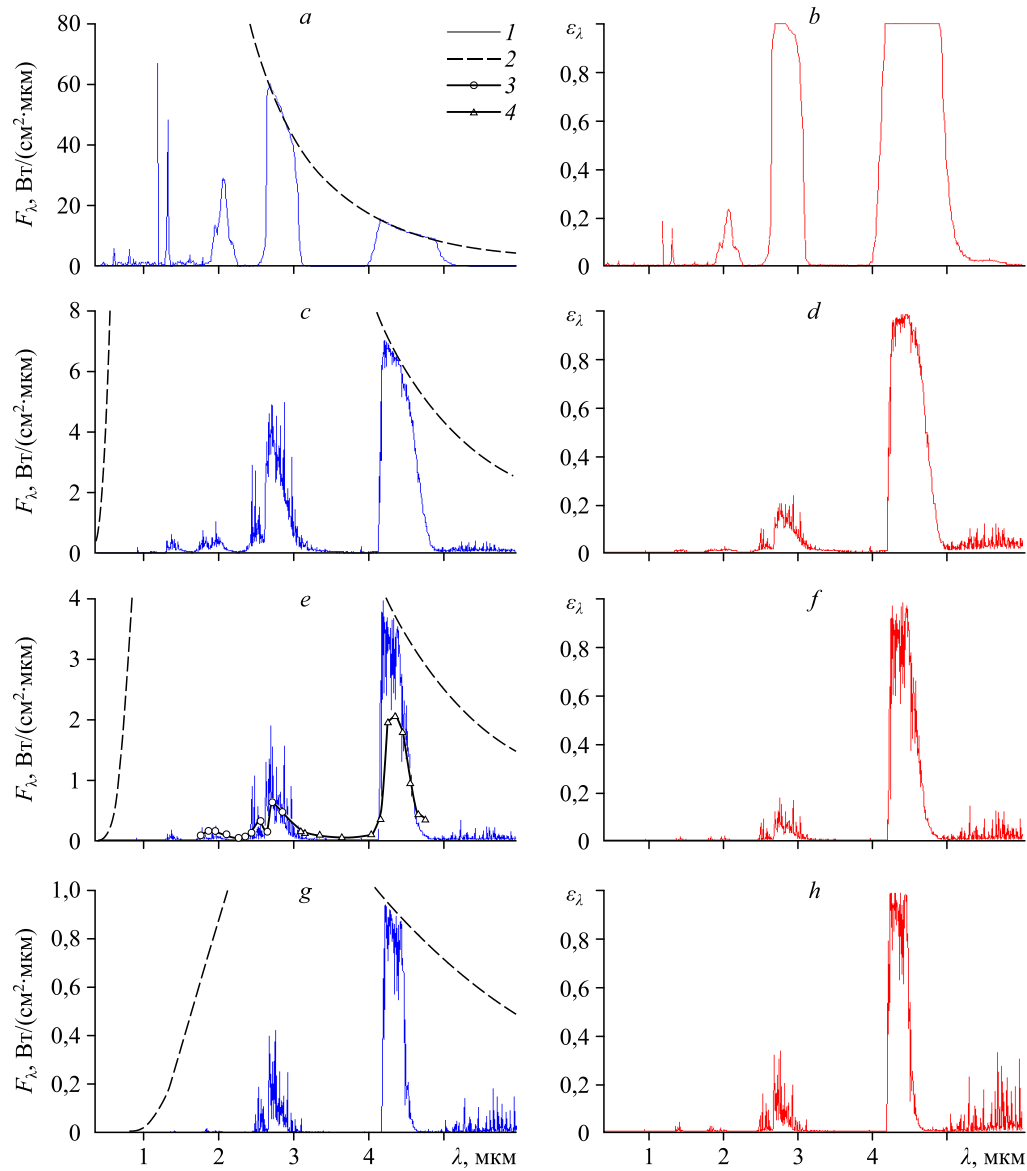


Рис. 2. Спектральная ППЭИ (a, c, e, g) и спектральная излучательная способность (b, d, f, h) ПС для камеры (a, b), сопла (c, d), НУФ (e, f), ОУФ (g, h) ЖРД.

1 — расчет по методике настоящей работы,
2 — функция Планка при $T = 3200$ (a), 2200 (c), 1660 (e), 1000 (g) К,
3 — измерения в коротковолновом участке спектра [25],
4 — измерения в длинноволновом участке спектра [25].

температуры и давления происходит снижение спектральной степени черноты ε_λ от 1 (в камере сгорания) до 0,2–0,3 (в факеле) вблизи полосы 2,7 мкм.

Анализ спектральных F_λ и ε_λ для модельного ЖРД свидетельствует о сохранении селективности излучения на всем пути следования ПС от камеры до факела. Проведено сопоставление расчетных данных по F_λ для НУФ вблизи среза сопла с экспериментальными результатами работы [25], полученными с помощью двух спектрометров в диапазонах длин волн 1,6–3,2 мкм и 3–5 мкм (см. рис. 2e). Дополнительно выполнено

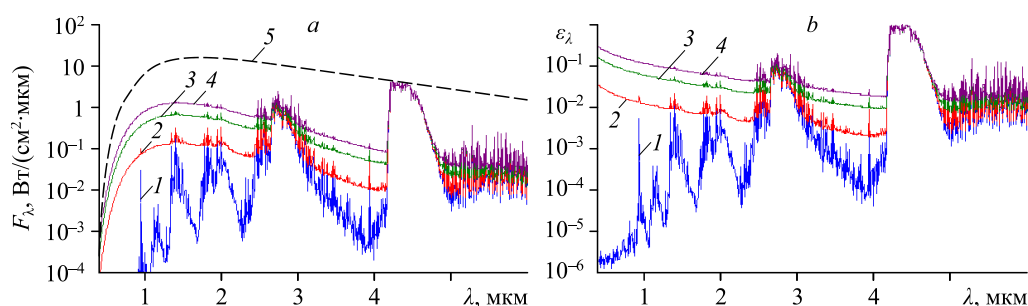


Рис. 3. Влияние наличия частиц сажи на спектральную ППЭИ (а) и спектральную излучательную способность (б) ПС для НУФ ЖРД. $z = 0$ (1), 0,001 (2), 0,005 (3), 0,01 (4), 5 — функция Планка при $T = 1660$ К.

исследование влияния возможного образования частиц сажи с массовыми долями $z = 0,001$, 0,005 и 0,01 и размерами частиц 0,04 мкм для НУФ модельного ЖРД (рис. 3). Присутствие частиц сажи в ПС дает сплошное излучение в окнах прозрачности газовой фазы. Наличие сажи увеличивает интегральную плотность потока F на 13 % ($z = 0,001$), 66 % ($z = 0,05$) и 129 % ($z = 0,01$) от величины $F = 1,475$ Вт/см², полученной без учета частиц сажи. При этом интегральная излучательная способность ε увеличивается на 14 % ($z = 0,001$), 66 % ($z = 0,05$) и 130 % ($z = 0,01$) (см. табл. 1). Влияние сажи сильнее проявляется в окнах прозрачности газовой фазы и почти не влияет на картину излучения в основных полосах H_2O и CO_2 вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм. На каждом исследуемом участке (камера, сопло, НУФ и ОУФ) полоса излучения CO_2 ($\lambda = 4,3$ мкм) может быть использована для пирометрического определения температуры ПС ЖРД. Для камеры сгорания в полосе 4,3 мкм $\varepsilon_\lambda = 1$, это позволяет измерять температуру спектральным пирометром.

3. Исследование характеристик излучения модельного РДТТ

Модельный РДТТ оснащен соплом с углом полуоткрытия $\beta = 15^\circ$ и диаметром критического сечения $d_{кр} = 6,8$ мм. ПС модельного РДТТ представляли собой частицы Al_2O_3 ($z = 0,2$) и газовую фазу следующего состава: $H_2O = 0,330$, $CO_2 = 0,101$, $CO = 0,163$, $O_2 = 0,014$, $H_2 = 0,026$, $N_2 = 0,166$ [26]. Система частиц конденсата описывалась функцией распределения

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

с параметрами $a = 1,642$ мкм⁻¹ и $b = 1,11$.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета характеристик излучения ПС модельного ЖРД

Рассматриваемый участок	Параметры				Результаты	
	$p, \cdot 10^5$ Па	T , К	L , мм	z	F , Вт/см ²	ε
Камера сгорания	70	3200	50	0	39,80	0,0683
Сопло	1	2200	40	0	4,649	0,0366
НУФ	0,29	1660	50	0	1,475	0,0375
				0,001	1,674	0,0426
				0,005	2,451	0,0624
				0,01	3,383	0,0861
ОУФ	0,29	1000	50	0	0,3021	0,0723

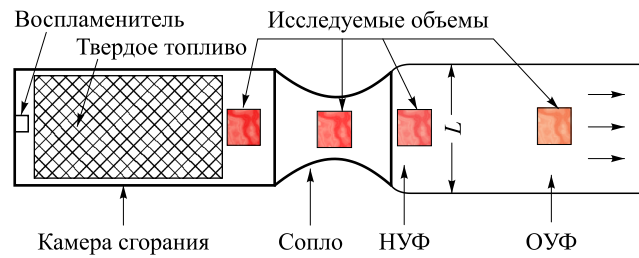


Рис. 4. Схема модельного РДТТ с обозначением исследуемых объемов.

Для условий камеры сгорания, сопла, НУФ и ОУФ были рассчитаны спектральные и интегральные характеристики излучения ПС в спектральном интервале $\lambda = 0,4 - 6$ мкм. Схема модельного РДТТ с обозначением исследуемых объемов представлена на рис. 4. Исходные данные для расчета указаны в табл. 2.

Для условий НУФ проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными данными при условии равновесного течения частиц и газа ($T_{\text{ч}} = T_{\text{г}} = 2000$ К) и при наличии температурной неравновесности ($T_{\text{ч}} = 2600$ К, $T_{\text{г}} = 2000$ К).

Графики спектральной плотности потока и спектральной степени черноты на каждом исследуемом участке представлены на рис. 5. Расчетные исследования показали, что при высоких температурах ПС ($T > 3000$ К) спектральное распределение ППЭИ близко к излучению серого тела, а степень черноты имеет ярко выраженную селективность в области основных излучающих компонентов газовой фазы. С понижением температуры ПС (при переходе от камеры сгорания к ОУФ) излучение газовой фазы становится преобладающим. В этом случае оказывается слабое влияние (до 5 %) на ε_{λ} в полосе 4,3 мкм и весьма заметное (до 75 %) в спектральном интервале 0,4–1 мкм, соответствующем излучению конденсированной фазы. Анализ результатов свидетельствует, что в камере сгорания основным источником излучения являются частицы Al_2O_3 , имеющие сплошное излучение (рис. 5a). Интегральная излучательная способность имеет значение больше 0,5 во всем спектральном интервале, а спектр излучения F_{λ} близок к излучению серого тела в области коротких длин волн. В расширяющейся части сопла на фоне сплошного излучения начинает сильнее проявляться полоса CO_2 (рис. 5c). На НУФ вблизи среза сопла из-за температурной неравновесности между газовой фазой и частицами конденсированной фазы сохраняется участок сплошного излучения, но с преобладанием основных полос излучения H_2O и CO_2 при $\lambda = 2,7$ мкм и 4,3 мкм соответственно (рис. 5e). Интегральная ППЭИ F при условии равновесного течения частиц и газа ($T_{\text{ч}} = T_{\text{г}} = 2000$ К) составляет 35 % данной величины при наличии температурной неравновесности ($T_{\text{ч}} = 2600$ К, $T_{\text{г}} = 2000$ К). Расчетные значения спектральной ППЭИ при учете температурной

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета характеристик излучения ПС модельного РДТТ

Рассматриваемый участок	Параметры				Результаты	
	$p, \cdot 10^5$ Па	$T_{\text{ч}}, \text{ К}$	$T_{\text{г}}, \text{ К}$	$L, \text{ мм}$	$F, \text{ Вт/см}^2$	ε
Камера сгорания	40,7	3200	3200	25	363,6	0,6241
Сопло	1,8	2200	2200	20	4,953	0,0390
		2800	2200		16,54	0,0486
НУФ	1	2000	2000	25	2,161	0,0252
		2600	2000		6,207	0,0247
ОУФ	1	1000	1000	40	0,281	0,0672

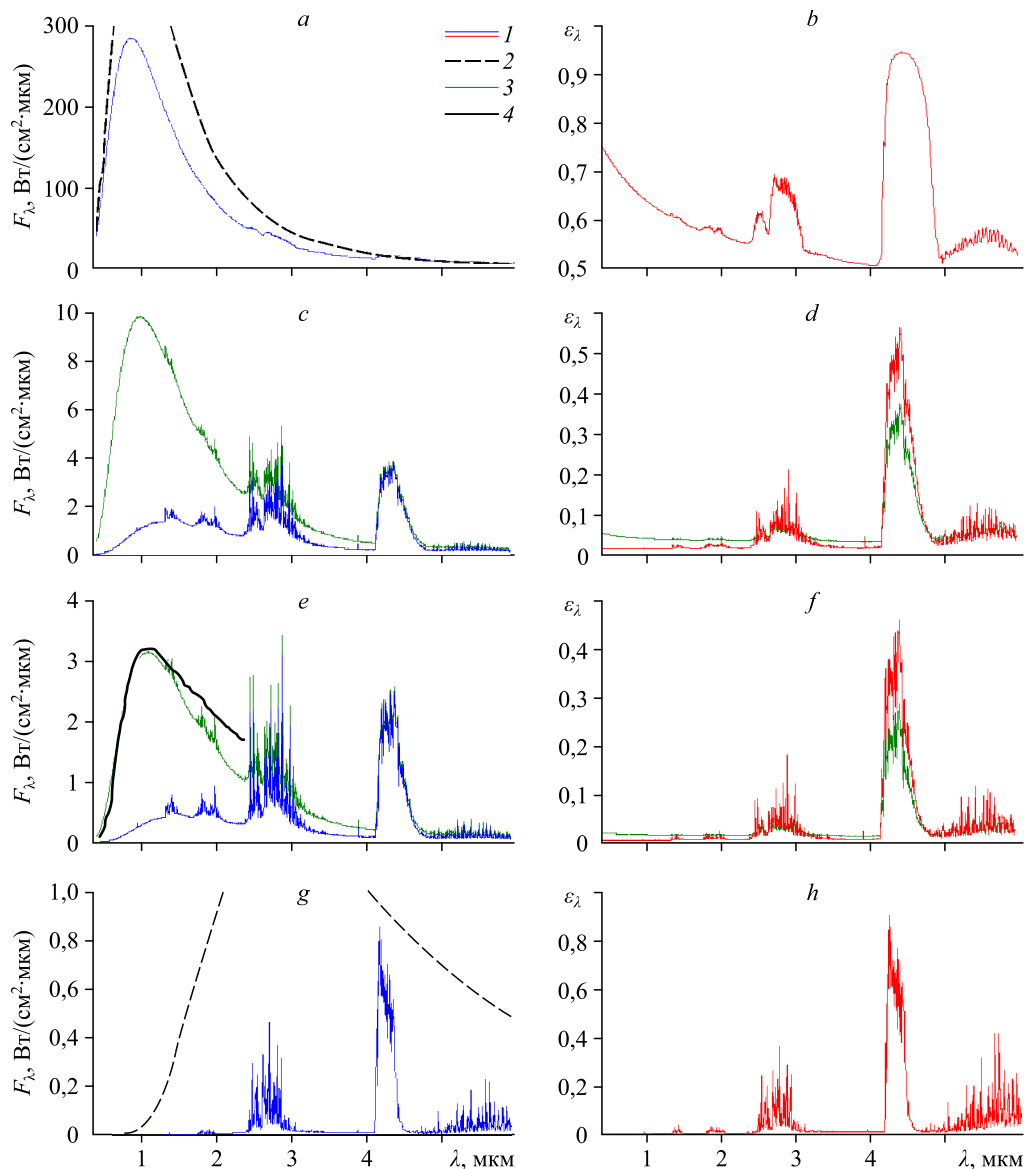


Рис. 5. Спектральная ППЭИ (*a, c, e, g*) и спектральная излучательная способность (*b, d, f, h*) ПС для камеры (*a, b*), сопла (*c, d*), НУФ (*e, f*), ОУФ (*g, h*) РДГТ.

1 — расчет по методике настоящей работы при равновесном течении газа и частиц,

2 — функция Планка при $T = 3200$ (*a*), 2800 (*c*), 2600 (*e*), 1000 (*g*) К,

3 — расчет по методике настоящей работы при учете температурной неравновесности, 4 — эксперимент [26].

неравновесности согласуются с экспериментальными результатами работы [26]. Следовательно, наличие температурной неравновесности между газом и частицами в потоке движущихся ПС необходимо учитывать в расчетах характеристик излучения. Это позволит планировать, прогнозировать и интерпретировать результаты эксперимента. Для ОУФ наблюдается явно выраженное селективное излучение ПС (рис. 5*g*).

Для модельного РДГТ селективность F_λ и ε_λ начинает проявляться в сопле и становится явно выражена в факеле. Причем на срезе сопла проявляется температурная неравновесность между газовой фазой и частицами конденсированной фазы. Она усиливает роль излучения частиц в окнах прозрачности газовой фазы и должна учитываться при моделировании теплового излучения ПС.

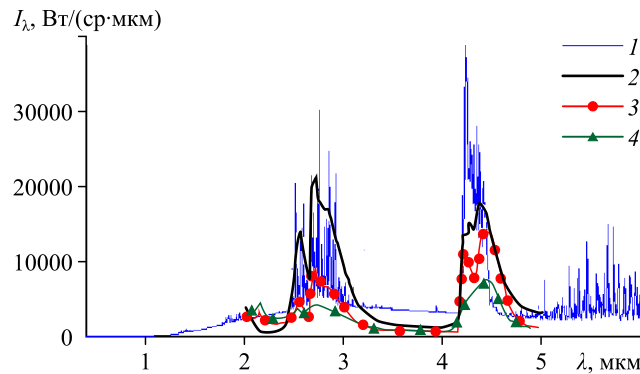


Рис. 6. Спектральная сила излучения факела тактической ракеты.

1 — расчет по методике настоящей работы,
 2 — результаты расчетов работы [7],
 3 — результаты расчетов работы [27] при $v = 3000$ м/с,
 4 — результаты расчетов работы [27] при $v = 1476$ м/с.

Авторами было проведено дополнительное исследование для определения излучения факела тактической ракеты на основе данных, приведенных в работе [7]. В камере сгорания давление $p = 53 \cdot 10^5$ Па, на выходе из сопла $p = 1,069 \cdot 10^5$ Па. Факел содержал частицы оксида алюминия ($z = 0,286$) и представлял собой монодисперсную систему с радиусом частиц $r = 1,5$ мкм. Состав выхлопной струи на срезе сопла был следующим: $H_2O = 0,103$, $CO_2 = 0,0124$, $CO = 0,169$. Температуры частиц и газовой фазы составляли $T_{\text{ч}} = 2470$ К и $T_{\text{г}} = 2070$ К соответственно. На рис. 6 представлены результаты расчета спектральной силы излучения I_{λ} факела тактической ракеты (поперечное направление наблюдения). Приводится сравнение результатов с расчетами других авторов, полученных путем решения интегро-дифференциального уравнения с помощью шестипотоковой программы SIRRM [7] и метода Монте-Карло при разной скорости течения v ПС [27]. Сравнение показывает, что в спектральном интервале 2–5 мкм постепенное изменение в ходе кривых согласуется с результатами других авторов [7, 27]. Наблюдаемое различие по уровню I_{λ} в области 3,2–4,2 мкм обусловлено влиянием свойств частиц конденсата, а именно разным выбранным значением показателя поглощения n_2 .

4. Обсуждение результатов

Анализ спектральных зависимостей ППЭИ и излучательной способности (F_{λ} и ε_{λ}) позволяет заключить, что для ЖРД сохраняется селективность излучения на всем пути истечения ПС от камеры сгорания до ОУФ. Причем спектральная полоса излучения CO_2 ($\lambda = 4,3$ мкм) вследствие высокого значения излучательной способности может быть использована для пирометрического определения температуры газовой фазы ПС.

Даже незначительное содержание сажи ($z = 0,001$), которое возникает на НУФ, повышает спектральные значения F_{λ} и ε_{λ} до нескольких порядков в зависимости от спектрального интервала, а интегральные значения F и ε повышаются на 13 % и более.

Для условий камеры сгорания уровень интегральной излучательной способности ПС ЖРД ($\varepsilon = 0,0683$) на порядок меньше соответствующей величины для РДТТ ($\varepsilon = 0,6241$). Для остальных участков тракта истечения ПС различие по ε может составлять 6–25 %

(сопло, в зависимости от учета температурной неравновесности в ПС РДТТ), 4–33 % (НУФ, без учета наличия сажи в ПС ЖРД и в зависимости от учета температурной неравновесности в ПС РДТТ) и 7 % (ОУФ).

Для РДТТ наблюдается резкая смена спектральной структуры излучения от сплошного (в камере сгорания) до явно выраженного селективного излучения ПС (на ОУФ). Поэтому подходы к определению температуры ПС могут быть разные. Кроме того, из-за температурной неравновесности между газом и частицами наблюдается повышенная светимость на НУФ со стороны сопла. Сравнение расчетных результатов настоящей работы с экспериментальными и расчетными данными других авторов позволяет сделать вывод о применимости данной методики для гомогенных и гетерогенных ПС.

Полученные результаты по характеристикам излучения для разных участков движущихся ПС модельных ЖРД и РДТТ показали, что присутствие частиц конденсированной фазы оказывает влияние в окнах прозрачности газовой фазы на условия факела, особенно при наличии температурной неравновесности на НУФ. В камере сгорания влияние конденсированной фазы на F_λ и ε_λ является определяющим для случая гетерогенных ПС.

Выводы

В работе исследовано изменение характера спектра излучения ПС модельных ЖРД и РДТТ по тракту «камера сгорания–сопло–начальный и основной участки факела». Проведено сопоставление расчетных результатов представленной работы с экспериментальными и расчетными данными других авторов. Особое внимание уделено характеру и уровню излучения для разных участков истекающих ПС.

Для ЖРД и РДТТ установлено влияние газовой фазы на спектральные и интегральные ППЭИ и излучательные способности ПС в камере сгорания, сопле, НУФ и ОУФ. При течении ПС от камеры сгорания к факелу как для ЖРД, так и для РДТТ селективность спектра становится наиболее выраженной, и это обстоятельство должно учитываться при выборе участка спектра для определения температуры ПС пирометрическими методами.

Проведена оценка влияния частиц сажи с массовыми долями $z = 0,001, 0,005$ и $0,01$ на спектральные и интегральные ППЭИ и излучательные способности ПС ЖРД для условий НУФ.

Для условий НУФ РДТТ выполнено сопоставление экспериментальных значений и расчетных результатов, полученных при условии равновесного течения частиц и газа ($T_q = T_r = 2000$ К) и при наличии температурной неравновесности ($T_q = 2600$ К, $T_r = 2000$ К).

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 // Тр. МАИ: электрон. журн. 2012. Вып. 51. 8 с.
3. Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Захаров А.А. Численное моделирование газодинамики факела ракетных двигателей // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 9 (21). 12 с.
4. Карташев А.Л., Карташева М.А. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. 158 с.

5. 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.
6. Нельсон Х.Ф. Влияние частиц на ИК-излучение выхлопных струй тактической ракеты // Аэрокосмическая техника. 1986. № 1. С. 119–127.
7. Нельсон Х.Ф. Оценка неопределенности расчета ИК-излучения факела ракеты // Аэрокосмическая техника. 1988. № 10. С. 161–168.
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. Guobiao C., Dingqiang Z., Xiaoying Z. Numerical simulation of the infrared radiative signatures of liquid and solid rocket plumes // Aerospace Sci. and Technology. 2007. Vol. 11. P. 473–480.
10. Qinglin N., Debin F., Shikui D., Heping T. A simplified model for fast estimating infrared thermal radiation of low-altitude under-expanded exhaust plumes // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 136. P. 276–287.
11. Modest M.F., Zhang H. The full-spectrum correlated-k distribution for thermal radiation from molecular gas-particulate mixtures // J. Heat Transfer. 2002. Vol. 124, No. 1. P. 30–38.
12. Qinglin N., Zhihong H., Shikui D. IR radiation characteristics of rocket exhaust plumes under varying motor operating conditions // Chin. J. Aeronaut. 2017. Vol. 30, No. 3. P. 1101–1114.
13. Ozawa T., Garrison M.B., Levin D.A. Accurate molecular and soot infrared radiation model for high-temperature flows // J. Thermophys. Heat Transfer. 2007. Vol. 21, No. 1. P. 19–27.
14. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник. В 10 т. / Под ред. В.П. Глушко. М.: ВИНТИ, 1971. Т. 1. 266 с.
15. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутков В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд. ТГУ, 1986. 262 с.
16. Вафин Д.Б. Расчет излучения осесимметричных двухфазных сред с температурной неравномерностью фаз // Вестн. КГТУ. 2009. № 1. С. 18–22.
17. Карлсон Д.Д. Экспериментальное определение теплового запаздывания при течении газа с твердыми частицами в сопле // Ракетная техника и космонавтика. 1962. № 7. С. 136–138.
18. Карлсон Д.Д. Экспериментальное определение динамического запаздывания частиц при течении смеси газ-частицы в сопле ракетного двигателя // Ракетная техника и космонавтика. 1965. № 2. С. 250–254.
19. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И. Характеристики теплового излучения факела модельного ракетного двигателя на твердом топливе с учетом скоростной и температурной неравномерностей газа и частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 1. С. 75–84.
20. Stonocypher T.E. Dynamic and thermal non-equilibrium in two phase flow in rocket nozzles // Report No. P-60-17. RohmandHaasCompany, Dec. 27, 1960.
21. Бабук В.А., Будный Н.Л., Ивоненко А.Н., Низяев А.А. Моделирование характеристик конденсированных продуктов в камере сгорания // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 3. С. 55–63.
22. 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.
23. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И., Рукавишников Р.В. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 385–400.
24. Михайленко С.Н., Бабинов 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.
25. Клейн Л., Пензиас Г.Д. Измерения спектральной плотности излучения струй модельных ракетных двигателей, работающих в условиях, имитирующих большие высоты, с помощью спектрометра со скоростной разверткой // Ракетная техника и космонавтика. 1967. № 9. С. 193–195.
26. Кузьмин В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. Киров: Полеск, 2004. 231 с.
27. Storozhev D.A. Numerical simulation of the underexpanded plume spectral radiance using Monte-Carlo method // J. of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1009. P. 012039-1–012039-13.

*Статья поступила в редакцию 10 ноября 2021 г.,
после доработки — 19 января 2022 г.,
принята к публикации 22 марта 2022 г.*