

УДК 541.11:547.235

## ИНФРАКРАСНЫЕ СПЕКТРЫ ТЕПЛОВЫХ ЛОВУШЕК ИЗ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОСТАВА МАГНИЙ/ТЕФЛОН/ВИТОН

Sherif Elbasuney, Amir Elsaidy, Mohamed Kassem, Hesham Tantawy,  
Ramy Sadek, Ahmed Fahd

Военно-технический колледж, Кобри-Элькоба, Каир, Египет  
s.elbasuney@mtc.edu.eg, sherif\_basuney2000@yahoo.com

Управляемая ракета с инфракрасным (ИК) наведением в 90 % случаев поражает самолет. Тепловые ловушки, изготавливаемые из специализированных составов на основе магния/тефлона/витона (МТВ), дают тепловую сигнатуру, мешающую ИК-системам самонаведения управляемых ракет. Проведено измерение ИК-сигнатуры МТВ-ловушки, имитирующей сопло реактивного двигателя. Отличительной чертой ИК-сигнатуры реактивного двигателя являются два характерных пика — в  $\alpha$ -полосе (диапазон длин волн  $2 \div 3$  мкм) и  $\beta$ -полосе ( $3 \div 5$  мкм), амплитуда которых коррелирует с излучением черного тела при температуре  $690^\circ\text{C}$ . Тепловая МТВ-ловушка, изготовленная из состава, включающего в себя 65 % Mg, обеспечивала увеличение средней интенсивности  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос соответственно в 21 и 4 раза по сравнению с интенсивностью этих полос для реактивного двигателя. Количественная оценка излучающих атомных групп в пламени горения проводилась с использованием термодинамического кода ICT. Для разработанной рецептуры МТВ-ловушек отношение интенсивностей  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос составило 0.96, что сопоставимо со значением для самолета 0.7.

Ключевые слова: спектроскопия, пиротехника, тепловая МТВ-ловушка, противодействие инфракрасной головке самонаведения, тепловая сигнатура.

DOI 10.15372/FGV20190511

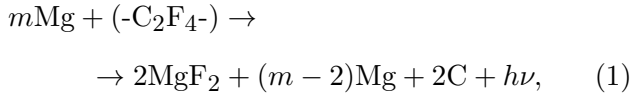
### ВВЕДЕНИЕ

Ракета с инфракрасной головкой наведения является одной из основных угроз для воздушных судов [1]. Инфракрасная (ИК) головка самонаведения ракеты обнаруживает индивидуальную ИК-сигнатуру и идентифицирует самолет как потенциальную цель [2]. Фюзеляж самолета излучает в диапазоне длин волн  $8 \div 10$  мкм, выхлопные газы —  $3 \div 5$  мкм, стенки реактивного двигателя —  $2 \div 2.5$  мкм [3]. Ракеты теплового наведения обычно ищут излучение, испускаемое воздушным судном, в полосах  $\alpha = 2 \div 3$  мкм и  $\beta = 4 \div 5$  мкм [4]. Защитой от теплового детектора могут быть ловушки, имитирующие ИК-излучение такого типа и с таким энергетическим выходом, на которые настроен детектор [5]. Тепловая ловушка представляет собой воздушную ИК-мишень, противодействующую ИК-системе самонаведения [6–10]. Свечение тепловых ловушек зависит от

металла, температура горения которого должна быть равна или выше температуры двигателя воздушного судна [1, 4, 11]. Составы для тепловых ловушек при горении должны испускать излучение, аналогичное излучению самолета, но с большей интенсивностью [3].

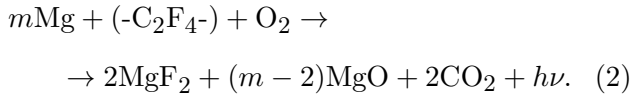
### 1. ИНФРАКРАСНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ЛОВУШКИ

Сажа ведет себя как черное тело. Поэтому пиротехнические системы, генерирующие большое количество тепла и сажи, могут быть кандидатами на применение в качестве тепловых ловушек. Составы для тепловых ловушек, изготавливаемые на основе магния в качестве топлива, тефлона в качестве окислителя и витона в качестве связующего, удовлетворяют этим требованиям. Они получили название «МТВ-ловушки» [3, 10]. МТВ-ловушки обеспечивают хорошее зажигание и высокую теплоту реакции [12–14]. Начальная стадия горения МТВ-системы может быть описана уравнением



где  $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота,  $m$  — число атомов или молекул.

Реакция горения состава МТВ требует учета кислорода, который поступает из атмосферы. Благодаря кислороду атмосферы происходит дожигание испаренного магния и углеродистых частиц. Теплота реакции нагревает углеродную сажу до температуры  $\approx 2200$  К, при которой ее светимость близка к светимости черного тела. Составы, богатые магнием, при  $m \geq 2$  дают дополнительную энергию при атмосферном окислении испаренного магния ( $T_v = 1100$  °С), увеличивая температуру реакции до 3100 К [1]. Кроме того, сажа может быть окислена до  $\text{CO}_2$ , что обеспечивает дополнительную энергию и увеличивает энергетическую светимость в полосе  $3 \div 5$  мкм. Продукты, образующиеся в этих реакциях, доминируют в характерной тепловой сигнатуре МТВ-ловушек [8, 15, 16]. Полная реакция горения может быть описана уравнением



Для оценки спектральных характеристик тепловой ловушки используется коэффициент  $\theta$  — отношение средней интенсивности излучения  $\alpha$ -полосы ( $2 \div 3$  мкм) к интенсивности  $\beta$ -полосы ( $3 \div 5$  мкм):

$$\theta = I_\alpha / I_\beta. \quad (3)$$

Для эффективной борьбы с атаками ракет, снабженных ИК-головками наведения, тепловая ловушка должна иметь значение  $\theta$ , близкое к значению этого параметра для самолета — порядка 0.7 [3]. На рис. 1 показаны тепловая сигнатура самолета и интенсивности излучения самолета и МТВ-ловушки [3].

Анализ светимости тепловых ловушек основан главным образом на теории теплового излучения. Согласно закону Планка спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела описывается выражением

$$W_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} [\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм})], \quad (4)$$

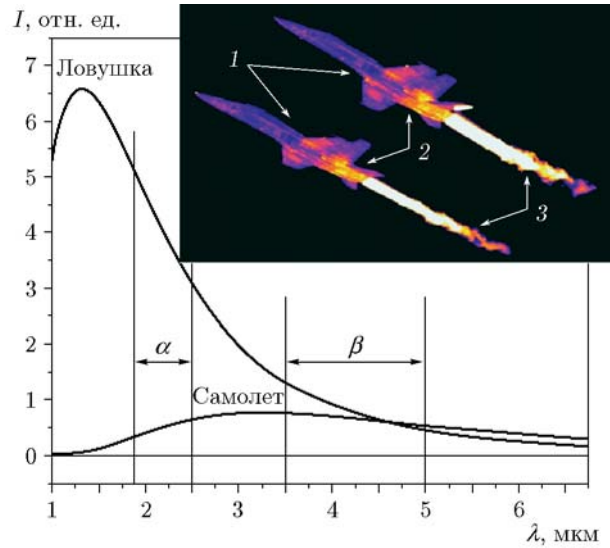


Рис. 1. Сравнение относительной амплитуды средней интенсивности излучения самолета и МТВ-ловушки [1]:

1 — нагретый фюзеляж,  $\lambda_{\max} = 8 \div 10$  мкм, 2 — горячие хвостовые трубки,  $\lambda_{\max} = 2 \div 2.5$  мкм, 3 — шлейф,  $\lambda_{\max} = 3 \div 5$  мкм;  $\alpha$ ,  $\beta$  — полосы

где  $\lambda$  — длина волны,  $T$  — абсолютная температура,  $c = 2.998 \cdot 10^{10}$  см/с — скорость света,  $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$  Вт·с/К — постоянная Больцмана. Положение максимума плотности излучения ( $\lambda_{\max}$ ) сдвигается в сторону более коротких длин волн (закон смещения Вина) при повышении температуры черного тела:

$$\lambda_{\max} T = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К}. \quad (5)$$

Закон Планка справедлив для идеального черного тела, в то время как тепловые ловушки являются достаточно серыми телами. Для описания отклонения реального случая от идеального вводится излучательная способность тела  $\varepsilon$  — отношение спектрального распределения мощности излучения реального излучателя ( $W'$ ) к спектральному распределению мощности излучения Планка для черного тела ( $W$ ), находящегося при той же температуре:

$$\varepsilon = W'/W, \quad (6)$$

$\varepsilon$  может меняться от единицы (черное тело) до нуля (источник без излучения) [1, 17].

Углеродная сажа приближается по свойствам к черному телу ( $\varepsilon = 0.95$ ); она образуется путем удаления фтора из углеродной цепи фторполимера. Составы, богатые Mg, дают некоторую дополнительную энергию за

счет окисления испаренного магния в газовой фазе ( $T = 3100\text{ K}$ ). Выделенный углерод окисляется с образованием  $\text{CO}_2$ , что обеспечивает линию интенсивного излучения при  $\lambda = 4.3\text{ мкм}$  [1, 18]. Существует несколько подходов к изменению интенсивности излучения МТВ-ловушек [1, 19–32]. Ранее сообщалось, что различные окислители, такие, например, как перфторированные тетразолы, могут дать бóльшую спектральную эффективность, чем ловушки на основе ПТФЭ, имеющие одинаковый фторидный баланс [33].

В качестве эталона, с которым сравнивались сигнатуры различных тепловых ловушек, использовалась измеряемая тепловая сигнатура турбореактивного двигателя P200SX с усиленным стартером. Измерения проводили спектрофотометром FT-MIR в диапазоне длин волн  $2 \div 6\text{ мкм}$ . Тепловая сигнатура реактивного двигателя отличалась двумя характерными пиками — в  $\alpha$ -полосе и в  $\beta$ -полосе (рис. 2) и в основном коррелировала с излучением го-

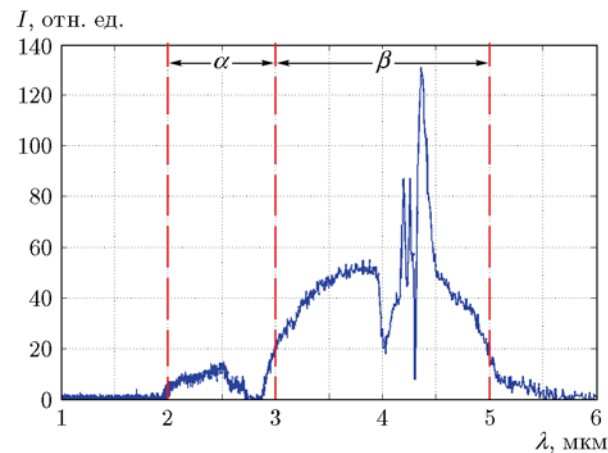


Рис. 2. Спектр излучения сопла реактивного двигателя

рячего сопла при его приближении спектром черного тела при температуре  $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поглощение ИК-излучения воздухом ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) могло ослаблять сигнал в полосе  $3 \div 4\text{ мкм}$  [34, 35]. Были разработаны тепловые МТВ-ловушки с различным содержанием горючего, которые прессовались в любом желаемом размере, и измерены их спектральные характеристики для сопоставления с тепловой сигнатурой реактивного двигателя. Тепловая ловушка продемонстрировала увеличение интенсивности  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос с ростом содержания  $\text{Mg}$  в рецептуре материала ловушек.

Количественная оценка температуры горения и концентраций основных видов излучающих активных частиц, таких как сажа,  $\text{MgF}_2$  и  $\text{Mg}$ , проводилась с использованием компьютерной программы химического равновесия ICT Thermodynamic Code (Институт химической технологии в Германии, 2008). Вычисленное значение коэффициента  $\theta$  для специализированной рецептуры МТВ составило 0.96, что находится в хорошем соответствии с литературными данными. Это подтверждает, что МТВ-ловушка с 65 %  $\text{Mg}$  может быть эффективна в качестве средства противодействия управляемым ракетам с ИК-наведением.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ. ТЕПЛОВАЯ СИГНАТУРА СОПЛА РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Основными компонентами для изготовления тепловой ловушки являются окислитель, металл и связка. Список использованных в работе компонентов представлен в табл. 1. Один компонент может иметь двойную функцию. Так, тефлон может действовать как связующее и как окислитель, Viton A — как пластификатор и как связующее.

Таблица 1

| Использованные химические вещества |            |                                                                        |                                       |               |
|------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Вещество                           | Функция    | Структура                                                              | Сорт                                  | Поставщик     |
| Тефлон                             | Окислитель | $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$                                        | $n = 20\,000$<br>Мелкий белый порошок | Alpha chemika |
| Магний                             | Горючее    | Mg                                                                     | 98 %, пудра                           | Alpha chemika |
| Viton A                            | Связующее  | $[-\text{CH}_2-\text{CF}_2-]_n-\text{CF}_2-\text{CF}(\text{CF}_3)-]_m$ | 1.85 г/см <sup>3</sup> , фтор 65 %    | Alpha chemika |

Таблица 2  
Химический состав разработанных тепловых ловушек

| Название состава | Mg, % | Тефлон, % | Viton A, % |
|------------------|-------|-----------|------------|
| F <sub>1</sub>   | 40    | 55        | 5          |
| F <sub>2</sub>   | 45    | 50        | 5          |
| F <sub>3</sub>   | 50    | 45        | 5          |
| F <sub>4</sub>   | 55    | 40        | 5          |
| F <sub>5</sub>   | 60    | 35        | 5          |
| F <sub>6</sub>   | 65    | 30        | 5          |
| F <sub>7</sub>   | 70    | 25        | 5          |

Проведено систематическое исследование разработанных рецептов с массовым содержанием топлива в диапазоне 40 ÷ 70 %, окислителя — 25 ÷ 55 %, связки — 5 %.

Химический состав исследованных рецептов МТВ-ловушек, имитирующих сигнатуру самолета, приведен в табл. 2.

При разработке тепловых ловушек особое значение придается смешиванию различных ингредиентов на молекулярном уровне, хорошей гомогенизации и допустимым механическим свойствам. В этом исследовании для производства тепловых ловушек использовали мелкодисперсный порошок Mg, в котором частицы размером 250 ÷ 300 мкм составляли 80 %, размером <250 мкм — 20 %, и мелкий белый порошок тефлона со следующим распределением размеров зерна: <2 мкм — 10 %, <20 мкм — 90 %. Окислитель, топливо и связующее тщательно перемешивали. Для сохранения однородности состава проводилось гранулирование, в противном случае легкие и плот-

ные материалы могли разделяться при транспортировке, обработке и хранении. Затем 25 г состава загружали в металлический цилиндр диаметром 2.5 см и после приложения давления 200 атм получали конечный продукт. Все исследованные составы были подготовлены одинаково по описанной методике, чтобы избежать любого изменения, которое могло бы повлиять на эксплуатационные качества. Оборудование, применяемое при подготовке тепловых ловушек и оценке спектральных характеристик, перечислено в табл. 3.

Для воспламенения использовался состав из KClO<sub>3</sub>, Mg, сажи и дымного пороха.

Экспериментальная установка для измерения спектральных характеристик в основном состоит из камеры сгорания, оптического волновода, спектрофотометра и системы приема и записи данных. Расстояние между держателем образца и оптоволоконным спектрометром составляло 1.5 м. Спектрометрические данные записывались в заданном диапазоне длин волн 2 ÷ 6 мкм. При вычислении среднего значения коэффициента  $\theta$  интенсивность (число отсчетов) осреднялась по  $\alpha$ - и  $\beta$ -полосам.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Влияние содержания магния на тепловую сигнатуру

Увеличение содержания Mg приводило к росту интенсивности в  $\alpha$ - и  $\beta$ -полосах. На рис. 3 показан ИК-спектр (в диапазоне 1 ÷ 6 мкм) для разработанных МТВ-ловушек как функция содержания Mg.

Рецептура МТВ с массовым содержанием магния 65 % обеспечивала наивысшую сред-

Таблица 3  
Оборудование для производства и измерения эксплуатационных характеристик МТВ-ловушек

| Оборудование                    | Функция                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Электронный пресс на 10 000 psi | Прессование смеси, образующей когерентный гомогенизированный конечный продукт для транспортировки, обработки и испытаний                                                                                                                                                                |
| Штамп                           | Стальной корпус с требуемыми размерами для прессования ловушек                                                                                                                                                                                                                          |
| Спектрофотометр FT-MIR          | Измерение длины волны и интенсивности<br>Материал светоделительной пластины CaF <sub>2</sub><br>Рекомендуемое оптоволокно — халькогенидное инфракрасное стекло<br>Спектральный диапазон 1 ÷ 6 мкм<br>На выходе — спектр образца<br>Отклик детектора в избирательном диапазоне длин волн |

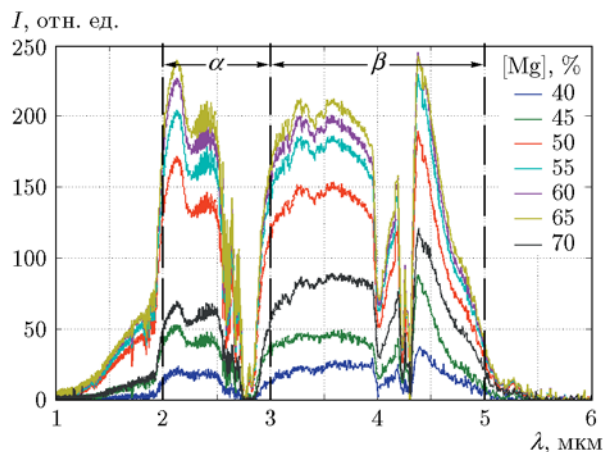


Рис. 3. Влияние содержания магния на тепловую сигнатуру МТВ-ловушек

ную интенсивность в  $\alpha$ - и  $\beta$ -диапазонах — соответственно в 21 и 4 раза выше по сравнению с интенсивностью этих полос для реактивного двигателя. Коэффициент отношения интенсивностей определен равным  $\theta = 0.96$ , что находится в хорошем соответствии с литературными данными. Максимальная интенсивность полос в спектре при содержании Mg в рецептуре 65 % коррелировала с оптимизированным процессом горения, который приводил к образованию наибольшего количества групп атомов, излучающих в ИК-диапазоне. Такая специализированная рецептура обеспечивает самое высокое образование конденсированного  $MgF_2$  — 42.2 % (излучение в ИК-диапазоне), 8.8 % углеродной сажи (идеальный серый излучатель,  $\varepsilon = 0.9$ ) и 48 % металлического топлива Mg, который действует как источник тепла из-за испарения (при 1100 °C) и окисления кислородом воздуха. Результаты соответствующих оценок количества продуктов сгорания приведены в табл. 4.

$MgF_2$  является группой атомов, которая излучает в ИК-диапазоне. Активные группы атомов могут формироваться в зоне первичного пламени 1 в непосредственной близости от поверхности горения (рис. 4). Первичная зона характеризуется высокой температурой горения и высокой плотностью углеродистых частиц, нагретых первичными продуктами сгорания (т. е.  $MgF_2$ ). Эти углеродистые частицы (углеродная сажа) при высокой температуре могут быть идеальными излучателями (серый излучатель,  $\varepsilon = 0.9$ ). К первичной реакционной зоне примыкает вторичная зона 2, в

Таблица 4

Влияние содержания топлива на образование химически активных излучающих групп атомов

| Топливо | C (s) | Mg (g) | MgF <sub>2</sub> (g) | MgF (g) | MgF <sub>2</sub> (l) |
|---------|-------|--------|----------------------|---------|----------------------|
| %       |       |        |                      |         |                      |
| 40      | 14.8  | 7.219  | 58.9                 | 17.3    | 0                    |
| 45      | 13.6  | 14.6   | 52.9                 | 15.5    | 2.3                  |
| 50      | 12.4  | 22.21  | 34.3                 | 14.2    | 16.06                |
| 55      | 11.2  | 30.4   | 18.44                | 10.96   | 28.5                 |
| 60      | 10.0  | 39.19  | 5.92                 | 5.7     | 38.8                 |
| 65      | 8.8   | 48.108 | 0.097                | 0.402   | 42.4                 |
| 70      | 7.6   | 55.5   | 0.00                 | 0.00    | 36.5                 |

Примечание. s — твердое состояние, g — газообразное, l — жидкое.

которой избыточное топливо Mg сжигается избыточным кислородом воздуха до  $MgO$  (серый эмиттер), существенно увеличивая теплоту. Во внешней зоне 3 наблюдаются термически возбужденные светящиеся углеродистые частицы, которые горят с образованием  $CO_2$ . Кроме того, образующийся  $CO_2$  может давать сильную пиковую эмиссию при  $\lambda = 2$  мкм и полосу интенсивного излучения при  $\lambda = 4.3$  мкм. Во внешней зоне может происходить полное окисление продуктов горения. Модель сгорания типичных тепловых МТВ-ловушек, фотографии горения МТВ-ловушек из [18] и разработанной в настоящей работе представлены на рис. 4.

Тепловая сигнатура реактивного двигателя характеризуется двумя пиками в  $\alpha$ - и  $\beta$ -полосах, которые коррелируют с излучением черного тела при температуре 690 °C. Поглощение ИК-излучения воздухом ( $CO_2$  и  $H_2O$ ) может ослабить сигнал в полосе  $\lambda = 3 \div 4$  мкм. Разработанная тепловая МТВ-ловушка характеризуется аналогичными полосами  $\alpha$  и  $\beta$ , но с большей интенсивностью из-за образования в пламени горения активных групп атомов, излучающих в ИК-диапазоне. Специализированная тепловая МТВ-ловушка из состава, содержащего 65 % Mg, привела к увеличению интенсивности  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос соответственно в 21 и 4 раза по сравнению с интенсивностью этих полос в случае реактивного двигателя (рис. 5). Данная специализированная рецептура дает значение отношения интенсивностей  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос  $\theta = 0.96$ , которое сопоставимо с величиной  $\theta$

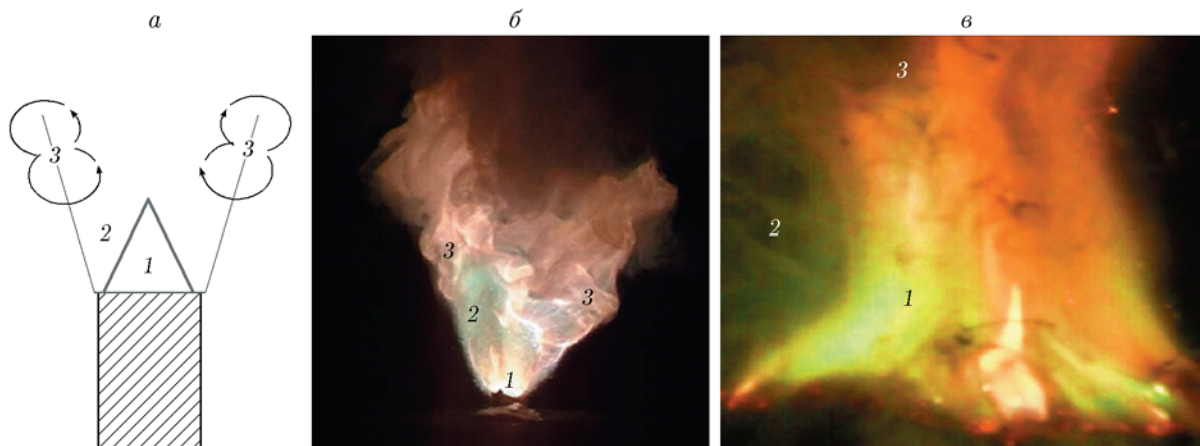


Рис. 4. Модель горения тепловой МТВ-ловушки (а), фотографии пламени горения МТВ-ловушек из работы [18] (б) и данной работы (в):

1 — зона первичного пламени, 2 — вторичная реакционная зона, 3 — внешняя зона

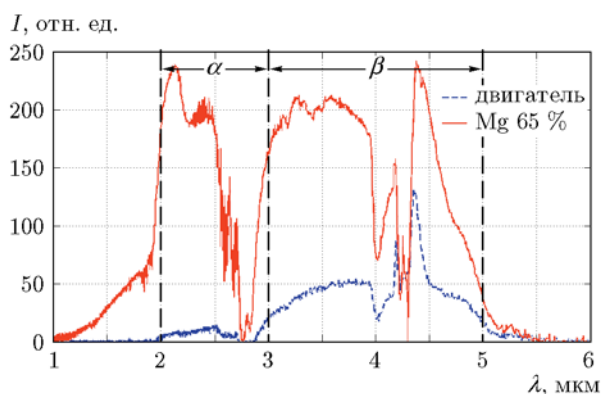


Рис. 5. Спектр специализированной тепловой МТВ-ловушки для имитации тепловой сигнатуры сопла реактивного двигателя

для самолета. Коэффициент  $\theta$  для реактивных двигателей зависит от типа и объема двигателя; так, для больших двигателей военных самолетов  $\theta = 0.7$ . В данной работе исследовался небольшой двигатель лабораторного масштаба с  $\theta = 0.3$ .

### 3.2. Влияние содержания магния на среднюю интенсивность $\alpha$ - и $\beta$ -полос

Тепловая сигнатура регистрировалась в виде зависимости интенсивности от длины волны  $I = f(\lambda)$ . Для расчета интенсивности полос  $I_\alpha$  и  $I_\beta$  необработанные спектрометрические данные интегрировали с помощью программного обеспечения MATLAB-R2014 b. Средняя интенсивность излучения  $\alpha$ -полосы ( $2 \div 3$  мкм)

и  $\beta$ -полосы ( $3 \div 5$  мкм) рассчитывалась с использованием правила трапеций в качестве метода численного интегрирования на дискретных наборах данных  $I(\lambda)$  [36, 37].

Интегрирование на отрезке с  $N + 1$  равномерно распределенными точками проводили по формулам

$$I_{\lambda_a - \lambda_b} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} I(\lambda) d\lambda \approx \frac{\lambda_b - \lambda_a}{2N} \times \sum_{n=1}^N (I(\lambda_n) + I(\lambda_{n+1})), \quad (7)$$

$$I_{\lambda_a - \lambda_b} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} I(\lambda) d\lambda \approx \frac{\lambda_b - \lambda_a}{2N} \sum_{n=1}^N (I(\lambda_1) + 2I(\lambda_2) + \dots + 2I(\lambda_N) + I(\lambda_{N+1})), \quad (8)$$

где  $\lambda_a = 2$  и  $3$  мкм соответственно для  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос;  $\lambda_b = 3$  и  $5$  мкм соответственно для  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос; скалярная величина  $(\lambda_b - \lambda_a)/N$  — расстояние между точками. Зависимость средней интенсивности  $\alpha$  и  $\beta$ -полос от содержания магния показана на рис. 6.

По влиянию содержания магния на среднюю интенсивность линии можно выделить три основных диапазона:

резкое увеличение интенсивности  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос при содержании Mg  $40 \div 50$  %,

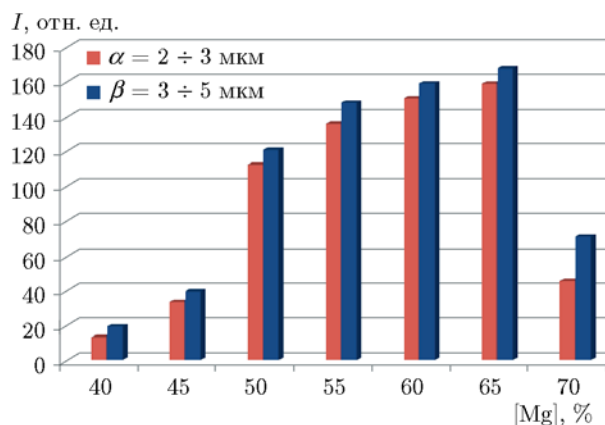


Рис. 6. Зависимость средней интенсивности  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос от содержания магния

слабое увеличение интенсивности  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос при содержании Mg 50 ÷ 65 %, снижение средней интенсивности при содержании Mg более 65 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МТВ-ловушка из состава с 65 % Mg показала наивысшую интенсивность теплового излучения в  $\alpha$ - и  $\beta$ -полосах. Получение лучших спектральных характеристик коррелировало с образованием конденсированного  $\text{MgF}_2$  (молекулярный инфракрасный излучатель с содержанием 42.4 %) и углеродной сажи (излучатель с  $\varepsilon = 0.9$ , близкий по свойствам к черному телу). Избыток магния в качестве металлического топлива может испаряться и гореть при взаимодействии с кислородом воздуха. Выделение в реакции горения значительного количества тепла возбуждает излучение сажи и продукта реакции  $\text{MgO}$  (серый излучатель с  $\varepsilon = 0.4$ ). Окисление сажи до  $\text{CO}_2$  обеспечивает сильное пиковое излучение при длинах волн 2 и 4.3 мкм. Разработанная рецептура МТВ позволила получить коэффициент отношения интенсивностей  $\alpha$ - и  $\beta$ -полос  $\theta = 0.96$ , который находится в хорошем соответствии со значением этого коэффициента для самолета.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Koch E. C. Review on pyrotechnic aerial infrared decoys // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2001. — V. 26. — P. 3–11.
2. Mahulikar S. P., Sonawane H. R., Rao G. A. Infrared signature studies of aerospace vehicles // *Prog. Aerosp. Sci.* — 2007. — V. 43. — P. 218–245.
3. Scheutzow S. Investigations of near and mid infrared pyrotechnics: Phd-thesis. — LMU, 2012.
4. Koch E. C. Pyrotechnic countermeasures: II. Advanced aerial infrared countermeasures // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2006. — V. 31. — P. 3–19.
5. Conkling J. A., Mocella C. Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory. — CRC Press, 2010.
6. Titterton D. H. A review of the development of optical countermeasures // *Eur. Symp. on Optics and Photonics for Defence and Security*, 2004. — P. 1–15.
7. Koch E. C., Dochnahl A. Investigation of combustion process in Magnesium/Teflon/Viton (MTV) compositions by emission spectroscopy // *30th Int. Annu. Conf. of the Fraunhofer ICT.* — 1999. — P. 87.
8. Koch E. C., Dochnahl A. IR emission behavior of magnesium/Teflon/Viton (MTV) compositions // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2000. — V. 25. — P. 37–40.
9. Douda B. E. Genesis of Infrared Decoy Flares: The Early Years from 1950 into the 1970s. — DTIC Document, 2009.
10. Koch E. C., Weiser V., Roth E., Knapp S. Metal-fluorocarbon pyrolants. XIII: High performance infrared decoy flare compositions based on  $\text{MgB}_2$  and  $\text{Mg}_2\text{Si}$  and polytetrafluoroethylene/Viton® // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2012. — V. 37. — P. 432–438.
11. Koch E. C. 2006–2008 annual review on aerial infrared decoy flares // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2009. — V. 34. — P. 6–12.
12. Bhingarkar V., Gandhi H., Phawade P., Singh H. Sensitivity and thermal analysis of MTV igniter compositions // *30th Int. Annu. Conf. of the Fraunhofer ICT.* — 1999. — P. 72.
13. Kuwahara T., Ochiai T. Burning rate of Mg/TF pyrolants // *J. Ind. Explos. Soc., Japan.* — 1992. — V. 53. — P. 301–301.
14. Gözmez A., Yilmaz G. A., Peke F., Özkar S. Development of MTV compositions as igniter for HTPB/AP based composite propellants // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1999. — V. 24. — P. 65–69.
15. Koch E. C. Metal/fluorocarbon pyrolants: VI. Combustion behaviour and radiation properties of magnesium/poly (carbon monofluoride) pyrolant // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2005. — V. 30. — P. 209–215.
16. Koch E. C. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials. — John Wiley & Sons, 2012.
17. Atkins P. W. Physical Chemistry. — Great Britain: ELBS, 1994.
18. Koch E. C. Metal-Halocarbon Pyrolant Combustion: Handbook of Combustion. — Wiley-VCH Verlag GmbH, 2010.
19. Koch E. C., Weiser V., Roth E. Combustion behaviour of binary pyrolants based on Mg,

- MgH<sub>2</sub>, MgB<sub>2</sub>, Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>Si and polytetrafluoroethylene // Proc. of the 37th Int. Pyrotech. Seminar (Europyro 2011). — 2011.
20. **Ellern H.** Military and Civilian Pyrotechnics. — N. Y.: Chem. Publ. Co., Inc., 1968.
21. **Fetherolf B., Snyder T., Bates M., Peretz A., Kuo K.** Combustion characteristics and CO<sub>2</sub> laser ignition behaviour of boron/magnesium/PTFE pyrotechnics // 14th Int. Pyrotech. Seminar. — 1989. — P. 22.
22. **Koch E. C.** Metal/fluorocarbon pyrolants: V. theoretical evaluation of the combustion performance of metal/fluorocarbon pyrolants based on strained fluorocarbons // Propell., Explos., Pyrotech. — 2004. — V. 29. — P. 9–18.
23. **Koch E. C.** Theoretical considerations on the performance of various fluorocarbons as oxidizers in pyrolant systems // 34th Int. Annu. Conf. of the Fraunhofer ICT. — 2003. — P. 40–40.
24. **Nielson D. B., Lester D. M.** Extrudable black body decoy flare compositions. — Google Patents, 2002.
25. **Koch E. C.** Metal-fluorocarbon pyrolants: VI. Behaviour of burn rate and radiometric performance of two magnesium/teflon/Viton (MTV) formulations upon addition of graphite // J. Pyrotech. — 2008. — V. 27. — P. 38.
26. **Kubota N., Serizawa C.** Combustion process of Mg/TF pyrotechnics // Propell., Explos., Pyrotech. — 1987. — V. 12. — P. 145–148.
27. **Douda B. E.** Pyrotechnic Flare Spectroscopy. A Radiative Transfer Model. — DTIC Document, 1974.
28. **Ralph S. T. I., Anderson R. C., Endicott D. W., Jr.** High-Intensity Infrared Decoy Flare. — Google Patents, 1996.
29. **Nadler M. P.** Pyrotechnic Pellet Decoy Method. — Google Patents, 2004.
30. **Shortridge R., Wilharm C.** Improved infrared countermeasures with ultrafine aluminum // 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conf. — 2004. — P. 2063.
31. **Poehlein S., Shortridge R., Wilharm C.** A comparative study of ultrafine aluminum in pyrotechnic formulations // Proc. 28th Int. Pyrotech. Seminar. — 2001. — P. 597–602.
32. **Koch E. C.** Metal-fluorocarbon-pyrolants: III. Development and application of magnesium/teflon/Viton (MTV) // Propell., Explos., Pyrotech. — 2002. — V. 27. — P. 262–266.
33. **Koch E. C., Hahma A., Klaputke T. M., Radies H.** Metal-fluorocarbon pyrolants: XI. Radiometric performance of pyrolants based on magnesium, perfluorinated tetrazolates, and Viton A // Propell., Explos., Pyrotech. — 2010. — V. 35. — P. 248–253.
34. **Yi K. J., Baek S. W., Gu B., Lee S. N., Kim M. Y., Kim W. C.** Infrared signature study of aircraft exhaust plume // The 15th Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. — 2014.
35. **Guarnieri J. A., Cizmas P. G.** A method for reducing jet engine thermal signature // Int. J. Turbo and Jet Engines. — 2008. — V. 25. — P. 1.
36. **Mazumder S.** Numerical Methods for Partial Differential Equations: Finite Difference and Finite Volume Methods. — Elsevier Science, 2015.
37. **King M. R., Mody N. A.** Numerical and Statistical Methods for Bioengineering: Applications in MATLAB. — Cambridge Univ. Press, 2010.

*Поступила в редакцию 09.04.2018.*

*После доработки 31.05.2018.*

*Принята к публикации 11.07.2018.*