

## Распределение яркости, температуры и силы излучения в многозонном факеле пиротехнического состава

© А.Н. Лепаев<sup>1</sup> С.И. Ксенофонтов<sup>2</sup> О.В. Васильева<sup>3</sup> А.В. Кокшина<sup>3</sup> В.А. Казаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, 428000 Чебоксары, Россия

<sup>2</sup> Чувашский государственный педагогический университет имени И.Я. Яковлева, 428000 Чебоксары, Россия

<sup>3</sup> Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 428015 Чебоксары, Россия

e-mail: it@polytech21.ru

Поступила в редакцию 31.05.2022 г.

В окончательной редакции 14.11.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Обработка изображения факела пиротехнического состава разработанными программными средствами позволяет выделить форму и размеры светящего тела факела, разбить его на зоны по уровню яркости, определить температуру и силу излучения каждой выделенной зоны. Методом сравнения яркостей зон факела с яркостью известного объекта определена температура зоны факела. Показано, что максимальная температура в факеле достигает 2523 К, а сила излучения в видимом диапазоне спектра равна 442 W/sr.

**Ключевые слова:** пиротехнический состав, факел, зона, яркость, температура, сила излучения, светящее тело.

DOI: 10.21883/OS.2022.12.54102.43-22

### Введение

Факел пиротехнического состава представляет собой высокотемпературный двухфазный реагирующий поток. Начиная с поверхности реагирования конденсированной фазы, параметры двухфазного потока меняются. Дисперсные частицы, концентрация которых в факеле высокая, реагируют как с газовой составляющей потока, так и с компонентами, содержащими горючее и окислитель. Горение в факеле сопровождается излучением в разных спектральных диапазонах. Регистрирующие приборы фиксируют энергию излучения в узком спектральном диапазоне. Излучение дисперсной фазы подчиняется законам теплового излучения со степенью черноты, близкой к единице [1].

Излучение факела обладает резкой яркостной неоднородностью. Сила излучения  $dI_i$  зоны факела зависит от его яркости  $L$  и площади зоны  $dS$ :

$$dI_i = \int_s L_i dS.$$

Яркость  $L$ , в свою очередь, зависит от температуры  $T$ , степени черноты  $\varepsilon$  и подчиняется закону Стефана–Больцмана для серых тел. Чтобы определить силу излучения факела, необходимо провести интегрирование по всем зонам факела. Однако до сих пор в литературе отсутствуют сведения о температуре пиротехнического факела и экспериментальный способ является практически единственным решением задачи о силе излучения подобных объектов.

В вопросе о структуре факела пиротехнического состава существуют различные точки зрения. Зарипов [2] на основе анализа интерференционных картин горения приходит к выводу, что в пиротехническом факеле имеется зона горения за счет кислорода окружающей среды. Согласно Зарипову диффундирование воздуха в факел происходит по всей его длине. Оно начинается на срезе торцевой поверхности горящего образца, а на некотором расстоянии от среза окружающий воздух уже доходит до центра факела. Участок от реакционного слоя конденсированной фазы вблизи поверхности до точки, в которой окружающий воздух доходит до центра факела, Зарипов предложил назвать ядром. Тогда получается, что ядро, которое вносит наибольший вклад в излучение факела, формируется только за счет исходных компонентов горючей смеси, и в этом процессе воздух не принимает участия. При таком подходе трудно объяснить, что наибольшую яркость и силу излучения имеют гетерогенные системы с перегрузкой горючего в исходной системе. Усманов [2] рассматривает факел как некий объем аэрозоля, где протекают гетерогенные процессы горения. Особое внимание он уделяет режимам истечения продуктов горения и полагает, что в факеле должен быть обязательно турбулентный участок. Согласно Усманову наличие ламинарных струек у основания факела говорит о том, что диспергирование вещества конденсированной фазы осуществляется не сразу со всей поверхности. Соприкосновение струек с последующим сливанием при их расширении на некоторой высоте от поверхности приводит к турбулизации потока. Усманов не рассмат-

ривал вопрос об особенностях проникновения воздуха в факел, но подчеркивал, что в факеле возможен особый механизм горения, заключающийся в самостоятельном сгорании отдельных элементарных объемов горючей смеси. Он считает, что горение частиц металла протекает по всему объему факела, но тогда трудно объяснить тот факт, что у большинства составов яркость факела имеет максимум у поверхности горения и стремительно уменьшается по высоте факела. Он полагает также, что поскольку однозначного определения структуры факела на сегодняшний день нет, важно рассматривать роль каждой зоны в процессах горения и излучения.

При определении температуры двухфазной системы, в которой протекают интенсивные химические реакции, используют два принципиально различных метода — зондовый метод и метод фотопирометрии. В условиях двухфазных потоков термпарное зондирование имеет целый ряд недостатков [3]. Прежде всего, являясь контактным методом определения температуры, зондовая термометрия вносит нежелательное воздействие на исследуемую систему. Обычно термпара вносит аэродинамические, термические и химические возмущения. Влияние термопары может быть снижено путем уменьшения размера спая. Но одновременно с этим снижается термостойкость зонда в высокотемпературных потоках и уменьшается область, которую зондирует термопара. Отметим, что с помощью этого метода регистрируют локальную температуру и для получения поля температур исследуемого объекта необходимо использовать гребенку термопар, а это ведет к усложнению системы измерения и увеличению погрешности метода.

Эти соображения предопределили интенсивную разработку методов фотопирометрии, заключающихся в регистрации электромагнитного излучения продуктов горения в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра. Еще в 60-е годы прошлого века были предложены различные методы фотопирометрии, которые успешно используются для изучения различных явлений в факеле газового пламени и в плазме [4,5]. Анализ этих методов показывает, что они малопригодны для изучения процессов, происходящих в современных пиротехнических составах. В факеле подобных объектов находится большое количество частичек металла в твердой и жидкой фазе, введенных для увеличения яркости излучения факела, имеются промежуточные продукты их сгорания. Однако многие явления, происходящие в факеле, как было указано выше, мало изучены. Для создания физических моделей процессов, протекающих в факеле пиротехнических составов и создания образцов с оптимальными свойствами, например имеющих максимальную яркость факела, актуальна разработка новых методик пирометрии, базирующихся, в частности, на возможностях современной телевизионной и вычислительной техники.

В настоящей публикации сделан первый шаг в направлении разработки методики, позволяющей определять

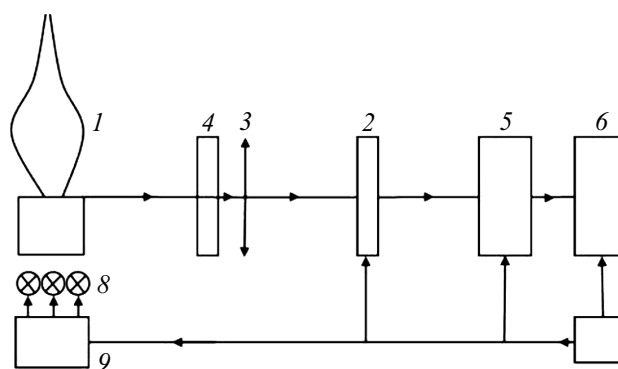


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

параметры факела, необходимые для создания физической модели факела пиротехнического состава. В работе использовалось оптико-телевизионное устройство, специально разработанное для изучения параметров структурно неоднородного факела новых пиротехнических составов. Целью работы являлись отладка методики и программного обеспечения для нахождения точной границы факела, учета неоднородности в распределении яркости его свечения, определения поля температур, области максимального свечения и суммарной силы излучения факела.

## Объект исследования, техника и методика эксперимента

Объектом исследования являлся пиротехнический состав на основе порошка магния, неорганического окислителя и углеводородного горючего ароматического ряда. Перемешанная смесь порошков состава запрессовывалась в картонную оболочку с внутренним диаметром 20 мм при удельном давлении 1500 kgf/cm<sup>2</sup>. Сжигание образцов проводилось при комнатных условиях.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Изображение факела (1) формировалось с помощью объектива „Индустар-50“ (3) на ПЗС-матрице видеокамеры PIC-741 (2). Полученное изображение с помощью периферийных устройств (5) вводилось в компьютер (6) и хранилось в памяти в виде отдельного файла в bmp-формате. В кадре находились также изображения спиралей нескольких галогенных ламп (8) типа КГМ-150. Лампы питались от стабилизированного источника питания (9). На каждую лампу подавалось определенное напряжение, вследствие чего спирали ламп облучались разной яркостью и температурой. Питание установки осуществлялось с общего блока (7). Размещение перед объективом камеры различных светофильтров (4) позволяло изучать объекты в разных спектральных диапазонах, начиная от ультрафиолетового (300 nm) и заканчивая ближним инфракрасным (1100 nm) диапазоном спектра. Скорость съемки видеокамеры составляла

25 fps. Продолжительность регистрации ограничивалась объемом памяти жесткого диска.

С помощью оригинального программного обеспечения изображение разбивалось на отдельные строки и элементы в строках — пиксели. Каждый пиксель в черно-белом изображении имел 256 уровней яркости. Чтобы использовать цифровое изображение в качестве средства определения фотометрических характеристик оптического изображения, необходимо установить соответствие между освещенностью в оптическом изображении и цифровыми значениями сигналов в электронном изображении. Эта зависимость выражается линейным участком характеристической кривой [6]. Применение светофильтров разной оптической плотности и диафрагмирование объектива позволяет вписаться в линейный участок данной характеристической кривой.

В программных средствах использовались электронные фильтры, которые, пробегая по строкам изображения, по-новому оцифровывали изображение, повышая его контрастность [7]. Границы факела определяются тем же электронным фильтром. Если в последовательных пяти пикселях градиент яркости оказывался положительным ( $dL/dx > 0$ ), то первый пиксель являлся границей факела. Границы определялись с левой и правой сторон изображения. Полученный массив границ факела позволяет рассчитать его видимую площадь:

$$S = \int_0^{h_{\max}} D dh,$$

где  $D = x_2 - x_1$  — диаметр факела в выделенной строке,  $x_1$  и  $x_2$  — координаты границ факела. Границы интегрирования по высоте задавались в программе от основания факела, а значение  $h_{\max}$  выбиралось из условия  $L = \bar{L}_f$  на максимальной высоте, где  $\bar{L}_f$  — яркость фона изображения.

Считая, что факел является осесимметричным объектом, можно вычислить его объем:

$$V = \frac{\pi}{4} \int_0^{\max} D^2 dh.$$

В данном случае объем факела складывается из объемов дисков высотой в один пиксель и диаметром, равным диаметру факела.

Далее массив распределения яркости изображения факела обрабатывается в математической среде Maple. Программные средства позволяют выделить 2D из 3D-распределения яркости, которые представляют зависимости  $L(x)_y$  или  $L(y)_x$  вдоль осей  $ox$  или  $oy$  соответственно при заданных значениях координат  $y$  или  $x$ . Кроме того, можно выделить пиксели с одинаковым значением яркости, последовательность которых представляет собой линию — изофоту. Оператор может выделить линии с определенным значением яркости  $L_i$ .

Семейство изофот разбивает факел на зоны по уровню яркости.

Полагали, что если пиротехнический факел обладает резкими оптическими неоднородностями, то зона, ограниченная изофотами яркостями  $L_i$  и  $L_{i+1}$ , обладает определенными оптическими свойствами. Выделенной зоне приписывалась средняя яркость:

$$\bar{L} = \frac{L_i + L_{i+1}}{2}.$$

При определении абсолютной яркости зоны в ходе измерений и обработки результатов возникают определенные трудности. По этой причине калибровку в измерениях проводили методом сравнения яркости зоны факела с яркостью известного объекта, температура которого определена заранее. При фотографировании факела в кадр помещали объект с известной излучательной способностью и температурой. Таким объектом служила спираль галогенной лампы КГМ-150. Температура спирали при фиксированном токе накала измерялась яркостным пирометром „Проминь“. Имея несколько ламп с разными токами накала, можно в одном кадре получить несколько объектов сравнения с разным набором температур.

Задавая значение яркости изображения, можно найти максимальную яркость объекта сравнения и одновременно выделить изофоту в факеле такой же яркости. Тогда этой изофоте можно приписать максимальную температуру объекта сравнения. Процедура сравнения яркостей объекта сравнения и факела в условных единицах (arb. units) показана на рис. 2.

Температура  $i$ -й изофоты с учетом закона Стефана–Больцмана для данного спектрального диапазона определялась следующим образом [8]:

$$T_i = T_0 \sqrt[4]{\frac{L_i}{L_0}},$$

где  $T_0$ ,  $L_0$  — максимальные температура и яркость спирали лампы. Проведенный нами анализ показал, что практически семейство изофот представляет собой семейство изотерм.

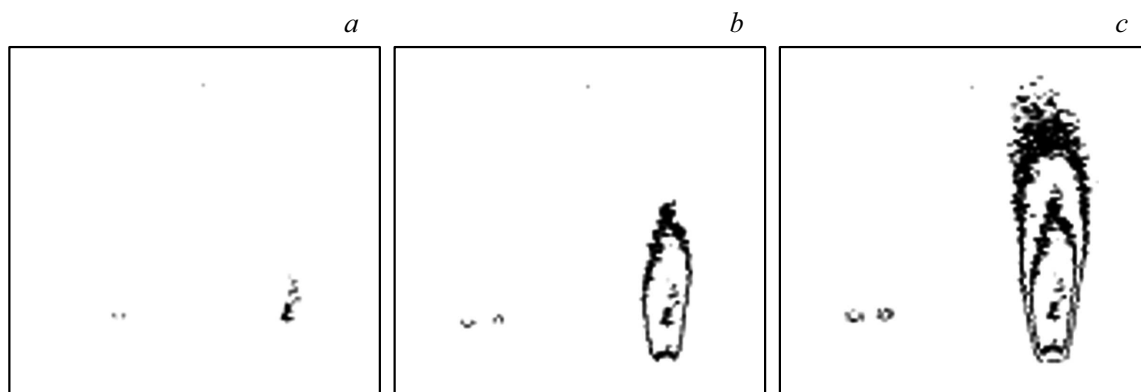
Определенная в выделенном спектральном диапазоне яркость зон факела по закону Стефана–Больцмана позволяет определить силу излучения отдельной зоны факела [9,10]:

$$I_i = \int_{S_i}^{S_{i+1}} L_i dS,$$

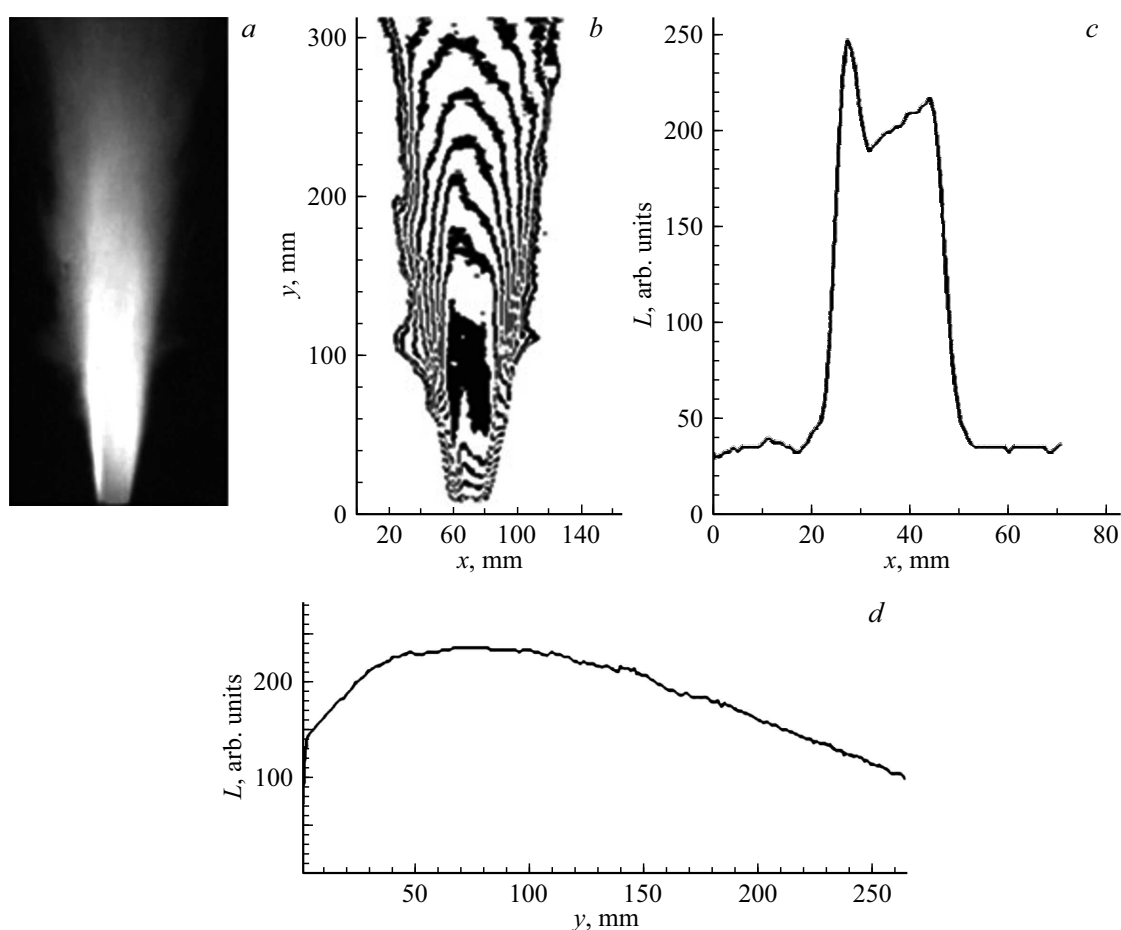
где  $S_i$  и  $S_{i+1}$  — площади выделенных зон.

Сила излучения всего факела  $I$  равна сумме сил излучения всех его зон:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i.$$



**Рис. 2.** Семейство изофот. Уровни яркости (в arb. units): (a) 128, (b) 102, (c) 76. Изображение объекта сравнения находится слева от факела.



**Рис. 3.** Факел пиротехнического состава: (a) фотография факела через плотный светофильтр, (b) изофоты, (c) распределение яркости по оси  $ox$  ( $y = 6$  mm), (d) распределение яркости по оси  $oy$  ( $x = 70$  mm).

## Результаты и обсуждение

Изображение факела, полученное через плотный нейтральный светофильтр НС-12, представлено на рис. 3, a, изофоты, отличающиеся друг от друга определенным шагом по яркости — на рис. 3, b. Как видно из рисунка, факел имеет яркостную неоднородность

(рис. 3, c). Наиболее яркая зона факела простирается по высоте от 60 до 120 mm от его основания (рис. 3, b), с увеличением высоты яркость факела монотонно убывает (рис. 3, d).

В таблице приведены основные фотометрические характеристики факела модельного пиротехнического состава в видимом диапазоне спектра. Яркости зон факела

Основные фотометрические характеристики зон факела

$L_i$ , arb. units	255	235	215	194	174	153	135	115	94	74
$S_i$ , cm <sup>2</sup>	9.10	18.75	11.76	11.90	13.75	16.80	19.73	29.99	19.94	16.41
$T_i$ , K	2523	2471	2415	2356	2291	2221	2153	2066	1968	1851
$I_i$ , W/sr	129.9	74.3	49.0	45.0	39.9	33.4	33.8	21.4	9.8	6.0
$I_i/I_0$ , %	29.3	16.8	11.0	10.1	9.0	7.55	7.63	4.83	2.21	1.35
$T^4 \cdot 10^{12}$ , K <sup>4</sup>	40.5	37.3	34.0	30.8	27.5	24.4	21.5	18.2	15.0	11.7

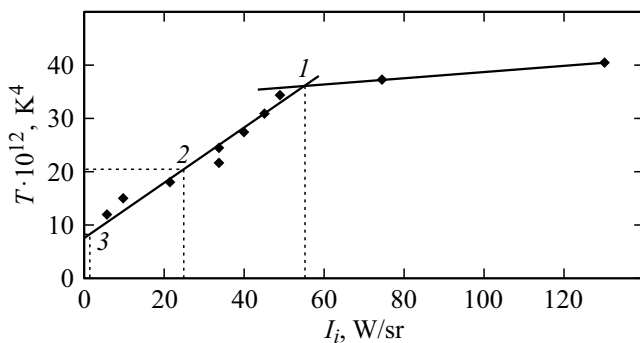


Рис. 4. График зависимости  $T^4(I)$ .

приведены в условных единицах. Яркость уровня фона изображения равна  $L_\phi = 64$  arb. units, а условная температура фона — 1660 К. Суммарная сила излучения в видимом диапазоне спектра составляет  $I_0 = 442.5$  W/sr. Как видно из таблицы, основное излучение исходит из высокотемпературных зон факела. Силы излучения первой и второй зон по отношению к силе излучения всего факела равны 29.3% при  $T_1 = 2523$  К и 16.8% при  $T_2 = 2471$  К соответственно.

Зонная структура пиротехнического факела позволяет определить форму и размеры основного светящего тела. Для определения указанных параметров приведем график зависимости четвертой степени его температуры от силы излучения (рис. 4).

Кривая имеет излом (точка 1), приходящийся на зону с яркостью  $L_1 = 223$  arb. units и силой излучения  $I_1 = 54$  W/sr. Температура этой зоны равна 2471 К. Данная изотерма по силе излучения разделяет факел на центральную и периферийную области. Площадь центральной области равна  $S = 27.35$  cm<sup>2</sup>, сила ее излучения  $I = 204.2$  W/sr, что составляет 46% излучения всего факела. Центральная область представляет собой основное светящее тело факела в видимом диапазоне спектра, ограниченное изотермой  $T_1 = 2471$  К.

Оптические датчики регистрируют излучение на уровне половины максимальной яркости (точка 2) и она равна  $L_2 = 127.5$  arb. units. Сила излучения в этой точке факела составляет  $I_2 = 26$  W/sr, температура  $T_2 = 2121$  К, а площадь светящего тела  $S_2 = 107$  cm<sup>2</sup>

с суммарной силой излучения 400 W/sr. Наиболее чувствительные оптические датчики могут регистрировать излучение на уровне  $0.2L_{\max}$  (точка 3). В этом случае яркость составляет  $L_3 = 60$  arb. units, сила излучения  $I_3 = 4.5$  W/sr, температура  $T_3 = 1660$  К. Площадь светящего тела факела  $S_3 = 179$  cm<sup>2</sup>. Предельные условия регистрации излучения в точке 3 описывают параметры выбранной видеокамеры.

В настоящей работе расчеты силы излучения проводились в предположении, что основной вклад в излучения вносят частички металла и других твердых компонент факела, излучение которых подчиняется законам теплового излучения со степенью черноты, близкой к единице. Кроме того, предполагалось, что поглощением, отражением и рассеиванием излучения указанными частичками можно пренебречь. Поэтому полученные результаты следует рассматривать как первый шаг к определению параметров, необходимых для создания физических моделей факела подобных пиротехнических средств. Для определения физических свойств факела с учетом реальных коэффициентов излучательных способностей, коэффициентов отражения, поглощения и рассеяния частиц, находящихся в факеле, необходимы дополнительные исследования. Эти исследования являются предметом дальнейших работ авторов.

## Заключение

На сегодняшний день не существует физической модели современных пиротехнических средств и соответственно единой методики, позволяющей по излучению пламени определять поле яркостей в разных спектральных диапазонах, поле температур, силу излучения факела и вклад в нее отдельных зон факела. В настоящей работе сделаны шаги для решения данной проблемы в видимом диапазоне спектра. На основе исследования свойств факела пламени образца, состоящего из порошка магния, неорганического окислителя и углеводородного горючего ароматического ряда можно сделать следующие выводы.

1. Создано устройство, состоящее из набора лампочек разной яркости, телевизионной камеры, компьютера и оригинального программного обеспечения, позволяющее с учетом неоднородной структуры изображения

объекта построить линии (зоны) одинаковой яркости излучения для разных длин волн в диапазоне от 400 до 760 nm, а также определять границы факела.

2. На основе полученных данных с учетом макроскопической осесимметричности пламени и ряда допущений и предположений найдены поля температур и силы излучения факела.

3. Показано, что основное светящее тело факела ограничено изотермой  $T_1 = 2471$  К, в видимом диапазоне спектра имеет площадь  $S = 27.35$  см<sup>2</sup>, сила ее излучения  $I = 204.2$  W/sr. Суммарная сила излучения пламени в видимом диапазоне спектра составляет 442.5 W/sr, максимальная температура в факеле равна 2523 К.

4. Разработанный фотометрический метод может быть рекомендован для диагностики излучения оптически плотных факелов пиротехнических составов. Данный метод является менее трудоемким и не требует больших временных затрат и дорогостоящего оборудования.

5. Недостатком проведенного исследования является предположение, что основной вклад в излучения вносят частички металла и других твердых компонент факела, излучение которых подчиняется законам теплового излучения со степенью черноты, близкой к единице. Кроме того, предполагалось, что поглощением, отражением и рассеиванием излучения указанными частичками можно пренебречь.

Для устранения указанных недостатков необходимы дальнейшие исследования.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность А.П. Владимирову (Институт машиноведения УрО РАН, УрФУ) за замечания к тексту, позволившие улучшить статью.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] С.И. Ксенофонтов. Вестник ЧГПУ, **2** (21), 177 (2001).
- [2] А.И. Хацринов, Г.С. Батурова, Н.Х. Валеев. *Пламя* (КГТУ, Казань, 1999), с. 49–50.
- [3] А.А. Зенин. Автореферат канд. дисс. (ИХФ АН СССР, М., 1962).
- [4] В.В. Пикалов, Н.Г. Преображенский. *Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы* (Наука СО, Новосибирск, 1987).
- [5] А.Е. Кадышев. *Измерение температуры пламени* (Металлургиздат, М., 1961).
- [6] В.К. Кирилловский. *Оптические измерения* (ГУ ИТМО, СПб., 2005).
- [7] А.М. Порфирьев, С.И. Ксенофонтов. *Программа расчета распределения яркости пламени по оптическому изображению*. [Электронный ресурс]  
URL: ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2008/11.doc
- [8] А.М. Порфирьев, С.И. Ксенофонтов. *Программа Flame — temperature“ для определения поля температур пламени*. [Электронный ресурс]  
URL: ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/8.doc
- [9] А.М. Порфирьев, С.И. Ксенофонтов, О.В. Васильева. *Программа Flame — candela“ для определения силы света пламени жидких углеводородов*. [Электронный ресурс]  
URL: ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2009/7.doc
- [10] О.В. Васильева, С.И. Ксенофонтов, А.Н. Лепав. В сб.: *XXXI международная Школа–симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике: материалы школы–симпозиума* / под ред. А.П. Владимирова. (УрФУ им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург), 2019, с. 143.