

## ФІЗИКА ГОРІННЯ

УДК: 621.791; 533.9

**Шевчук В.Г.<sup>1</sup>, Полетаев Н.И.<sup>1</sup>, Стариков М.А.<sup>2</sup>, Шингарёв Г.Л.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт горения и нетрадиционных технологий, Одесский национальный университет  
им. И.И. Мечникова (ОНУ), ул. Дворянская 2,  
г. Одесса, Украина, 65026, E-mail: incotb@ukr.net*

<sup>2</sup> *НПП «Коловрат», ул. Ахматовой Анны, 5/107а, г. Киев, Украина, 02068*

<sup>3</sup> *НИИ физики, ОНУ им. И.И. Мечникова, ул. Дворянская 2, г. Одесса.*

### **Радиационные свойства горящих облаков металлической пыли.**

#### **3. Модификация спектра излучения**

*Исследованы спектры излучения продуктов сгорания малообъёмных пылевых облаков ( $V = 5$  л) алюминия (АСД-4), а также смесевых составов алюминия с неорганическими порошкообразными окислителями ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) и горючими ( $\text{B}$ ,  $\text{AlB}_2$ ,  $\text{Cu}$ ). Рассмотрены возможности целенаправленной модификации спектра излучения базового состава с помощью различных инертных и оптически активных дисперсных добавок, смещающих максимум спектра излучения горючего состава в область более длинных волн или вызывающих локальное изменение спектра излучения в соответствующих областях спектра. Установлено, что введение добавок в базовый состав дисперсного горючего существенно не меняет динамические характеристики взвеси, однако приводит к снижению температуры (примерно на  $100 \div 200\text{K}$  при наличии добавки до 25 % по массе) и к соответствующему смещению максимума спектра излучения. Экспериментально показана возможность существенной локальной модификации спектра в жёлтой области с помощью неорганических добавок к горючему солей натрия с невысокой температурой разложения (добавки  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). К значительному увеличению светимости пламени в зеленой области спектра с максимумом излучения в диапазоне  $\Delta\lambda = 530 \div 580$  нм приводят добавки бора и соединений бора ( $\text{B}$ ,  $\text{AlB}_2$ ). Приведены светотехнические характеристики (силы света, светосуммы) больших облаков ( $V \geq 10 \text{ м}^3$ ) смесевых составов на основе алюминиевой пудры ПАП-2. Установлено, что введение неорганических добавок к базовому горючему не приводит к заметному изменению светотехнических характеристик, но несколько увеличивает время свечения облака как в видимой, так и в инфракрасной части спектра.*

**Ключевые слова:** горящие облака металлов, спектральный анализ, светотехнические характеристики пламени, радиоизлучение горящих облаков, термоэмиссионная пылевая плазма

В первой части [1] данного цикла работ представлена методика исследования радиационных характеристик горящих облаков металлической пыли, включающая одновременное измерение радиуса зоны горения, температуры пламени, интегрального потока излучения в диапазоне  $2 \div 20$  мкм и силы света.

Во второй части [2] цикла работ представлены результаты измерений указанных величин для облаков с начальным объёмом более  $10 \text{ м}^3$ . Одним из вы-

водов этих исследований является то, что радиационные характеристики больших облаков соответствуют таковым для малообъёмных облаков ( $V = 5$  л). Это позволяет изучать данные характеристики в лабораторных малообъёмных условиях.

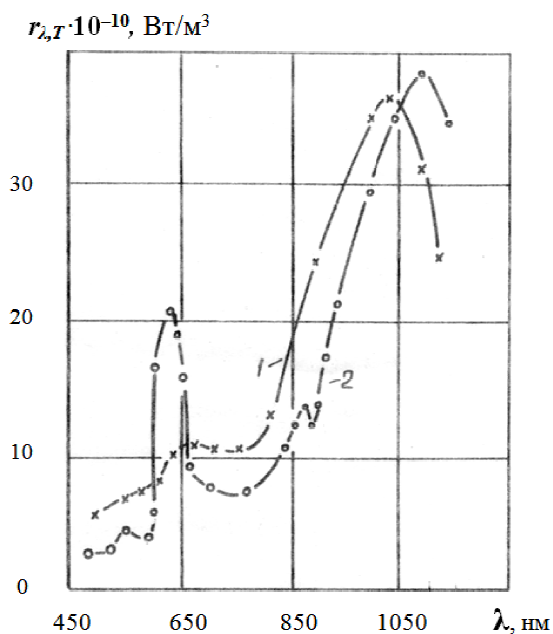
Важным вопросом, касающимся горения пылевых облаков, является возможность целенаправленной модификации спектра излучения базового состава с помощью различных дисперсных добавок. Здесь имеются две возможности. Во-первых, введение инертной добавки в принципе снижает температуру горения базового состава и, следовательно, должно смещать максимум спектра излучения базового состава в область более длинных волн. Во-вторых, введение оптически активных добавок (способных к возбуждению оптических переходов в пламени базового состава) должно производить локальное изменение спектра излучения в соответствующих областях.

С целью проверки указанных возможностей проводились исследования малообъёмных горючих композиций на основе базового горючего (алюминий АСД-4) и добавок неорганических порошкообразных окислителей, широко применяемых в пиротехнических составах [3] –  $NaNO_3$ ,  $NaCl$ ,  $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ ,  $Sr(NO_3)_2$ ,  $Ba(NO_3)_2$ ,  $KNO_3$ ,  $CuSO_4$ ,  $CuSO_4 \cdot 10H_2O$  и горючих  $B$ ,  $AlB_2$ ,  $Cu$ ,  $Nb$ . Добавки предварительно измельчались до размеров  $10 \div 30$  мкм. Опыты проводились с малообъёмными облаками ( $V = 5$  л).

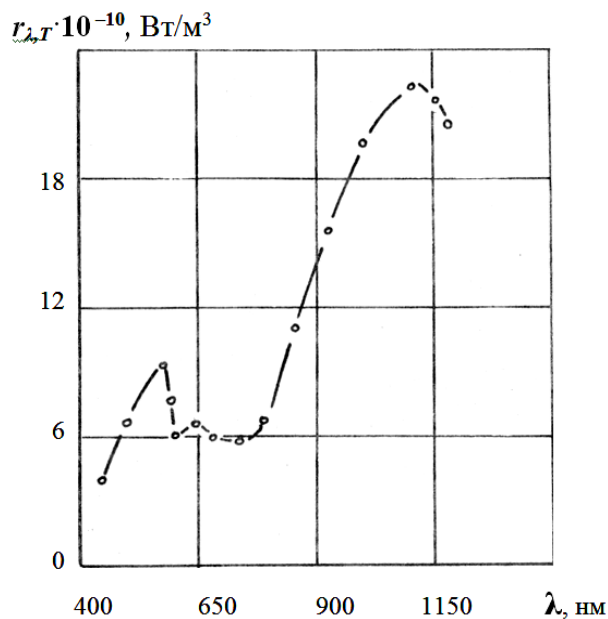
Необходимо отметить, что введение добавок в базовый состав существенно не меняет динамических характеристик взвеси, однако снижение температуры (примерно на  $100 \div 200$  К при наличии добавки до 25 % по массе) приводит к соответствующему смещению максимума спектра излучения (рис. 1-3). Также незначительно, по сравнению с базовым горючим составом, меняются и интегральные светотехнические характеристики смесевых составов. Более существенным оказывается локальный эффект модификации спектра. Спектры регистрировались сканирующим монохроматором (частота  $\approx 100$  об/с) на основе двух интерференционных клиньев со спектральным интервалом  $\Delta\lambda = 400 \div 1000$  нм и  $\Delta\lambda = 680 \div 1200$  нм [5].

Например, для добавок на основе натрия максимальный эффект производит  $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$  (рис. 1). Введение указанной добавки приводит к сильному уширению дуплета  $Na$ , что обусловлено значительной реабсорбцией не только в центре линии, но и на её крыльях. Одновременно наблюдается и перераспределение интенсивности в сплошном спектре, обусловленное снижением температуры горения.

Измерения относительного изменения интенсивности в области жёлтого дуплета  $Na$  ( $\lambda = 588$  нм), проведенные с помощью монохроматора ДМР-4 с фотографической регистрацией сигнала ФЭУ-62, показали, что для указанного состава интенсивность излучения возрастает в восемь раз при массовом содержании добавки 20 %. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что среди испытанных соединений на основе натрия (состав жёлтого огня) максимальный эффект производит соединение, обладающее низкой температурой фазовых переходов (так для  $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$  температура плавления  $t^{пл} = 32.5^\circ C$ ).



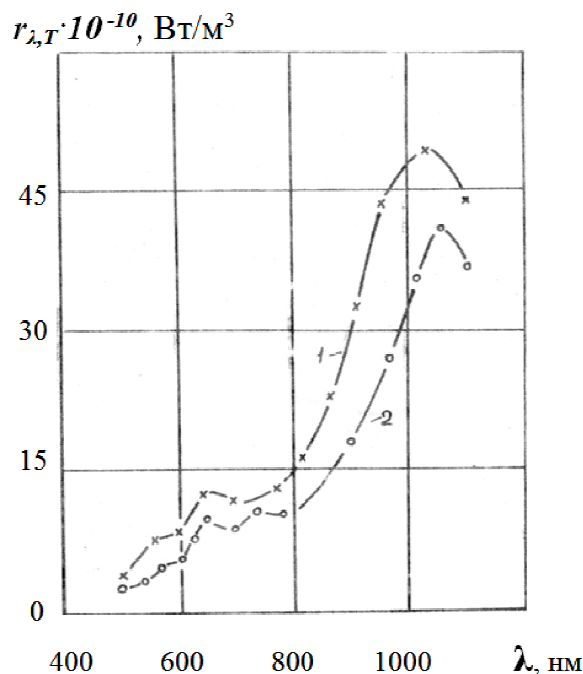
**Рис. 1.** Спектральная излучательная способность состава  $Al + Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$  с концентрацией алюминия  $B_{Al} = 200 \text{ г/м}^3$ . Кривые: **1** – АСД-4; **2** –  $Al + Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$  (20 %)



**Рис. 2.** Спектральная излучательная способность состава  $Al + AlB_2$  (30%) с концентрацией алюминия  $B_{Al} = 200 \text{ г/м}^3$ , АСД-4

Аналогичная серия опытов, проведенных с целью модификации спектра излучения в синей области (композиции  $Al + Cu$ ,  $CuSO_4$ ,  $CuSO_4 \cdot 6H_2O$ , добавки в пределах 10÷40% по весу) и зелёной области ( $Al + Ba(NO_3)_2$  по весу 5÷30%), положительного эффекта не выявила. Отметим, что указанные соединения обладают достаточно высокими температурами фазовых переходов. Заметную зелёную окраску пламени удалось получить в композициях  $Al$  (АСД-4 +  $B$  (20÷40 %)). При концентрациях бора свыше 30% наблюдалась изумрудно-зелёная окраска, обусловленная характерными молекулярными полосами ( $\Delta\lambda = 490 \div 580 \text{ нм}$ ) продуктов сгорания бора  $BO$ ,  $B_2O_2$  и  $BO_2$  [6] с максимумом излучения ( $\Delta\lambda = 530 \div 580 \text{ нм}$ ) (рис. 2).

Композиции  $Mg$  ( $d_{10} = 7 \text{ мкм}$ ) +  $B$  ( $d_{10} = 2 \text{ мкм}$ ) также производили зелёную окраску пламени при концентрации бора  $\geq 30 \%$ . При концентрации бора свыше 50% имело место только частичное распространение пламени.



**Рис. 3.** Спектральная излучательная способность состава  $Al + Sr(NO_3)_2$  с концентрацией алюминия  $B_{Al} = 200 \text{ г/м}^3$ . Кривые: **1** – АСД-4; **2** –  $Al + Sr(NO_3)_2$  (20 %)

**Таблица 1.** Светотехнические характеристики горящих облаков

Горючее	Масса состава, кг	Время свечения до $I_{max}$ , с	Время свечения до $0,1 \cdot I_{max}$ при остывании с	Время свечения в ИК области, с	Сила света, $I_m \cdot 10^{-6}$ , Кд	Удельная светосумма $L \cdot 10^{-3}$ , Кд·с/г
ПАП-2 + $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	2.8	0.1	0.8	2.0	8.9	2.50
ПАП-2+ $Ba(NO_3)_2$	2.8	0.12	0.9	1.9	7.8	2.50
ПАП-2+ $NaCl$	3.0	0.1	1.0	1.8	7.4	2.46
ПАП-2+ $B$	2.2	0.1	0.7	1.4	7.0	2.0

\* здесь под временем свечения до  $0,1 \cdot I_{max}$  подразумевается время полного свечения, включающее стадию остывания.

Резюмируя описанные выше исследования по модификации спектра базового состава, отметим ещё раз, что в условиях объёмных аэрозвесей только ограниченное число соединений (таких как  $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$  в композициях жёлтого огня, обладающих низкой температурой плавления  $t^{пл}$ , и в меньшей степени  $Sr(NO_3)_2$  (рис. 3) в композициях красного огня или  $B$  или  $AlB_2$  в композициях зелёного огня, которые сами при сгорании образуют продукты, дающие характерные полосы в спектре) способны вызвать существенную модификацию сплошного спектра излучения продуктов сгорания базового состава. В этой связи заметим, что с нашей точки зрения, наиболее перспективным для целей модификации спектра (а также и для тепловой возгонки реагентов в условиях тропосферы) является нанесение добавок в качестве покрытия на частицы базового горючего (произвести капсулирование) [4].

Основные светотехнические параметры (сила света  $I$ , удельная светосумма  $L$  источника излучений) изучались в полевых условиях для облаков аэрозвесей (объёмом  $\geq 10 \text{ м}^3$ ) [2] как базового (алюминиевая пудра ПАП-2), так и смесевых составов. Характерные светотехнические параметры приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы, введение неорганических добавок к базовому горючему не приводит к заметному изменению светотехнических характеристик, хотя и несколько увеличивает время свечения облака как в видимой, так и в инфракрасной части спектра.

**Выводы.** Проведение исследований подтверждает возможность модификации спектра излучения базового пылевого горючего с помощью различных дисперсных добавок неорганических порошкообразных окислителей и/или соединений бора. Дальнейшее изучение данной проблемы, с нашей точки зрения, должны включать в себя, прежде всего, исследования влияния дисперсности добавки (с точки зрения согласования времён возгонки частиц добавки и времён их пребывания в зоне горения), а также горения гибридных пылевых систем, частицы которых капсулированы (покрыты) соответствующей добавкой.

### Литература:

1. Шевчук В.Г, Полетаев Н.И., Стариков М.А., Нимич А.В. Радиационные свойства горящих облаков металлических пылей 1. Методика экспериментальных исследований. // Физика аеродисперсных систем. – 2019. – Вып. 57. – С. 93-103.
2. Шевчук В.Г, Полетаев Н.И., Стариков М.А., Нимич А.В., Шингарёв Г.Л. Радиационные свойства горящих облаков металлических пылей 2. Экспериментальные исследования. // Физика аеродисперсных систем. – 2020. – Вып. 58. – С. 77-83.
3. Шидловский А.А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973, – 320 с.
4. Ягодников Д.А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, – 445 с.
5. Беликский Н.И., Козицкий С.В., Флорко А.В. Скоростной спектральный прибор для исследования излучательных характеристик ВСД. // Физика аеродисперсных систем. – 1986. – Вып. 28. – С. 38-42.
6. Коваль Л.А., Вовчук Я.И., Клячко Л.А., Флорко А.В. Исследование спектра газовой фазы при воспламенении бора. // Химическая физика процессов горения и взрыва. – Черноголовка: ИХФ РАН, 1992, – С. 708-713.

**Шевчук В. Г., Полетаев М. И., Стариков М. А., Шингарёв Г. Л.**

**Радіаційні властивості палаючих хмар металевого пилу.**

### **3. Модифікація спектра випромінювання**

#### **АНОТАЦІЯ**

Досліджено спектри випромінювання продуктів згоряння малооб'ємних пилових хмар ( $V = 5$  л) алюмінію (АСД-4), а також сумішевих складів алюмінію з неорганічними порошокподібними окислювачами ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) і горючими ( $\text{B}$ ,  $\text{AlB}_2$ ,  $\text{Cu}$ ). Розглянуто можливості цілеспрямованої модифікації спектру випромінювання базового складу за допомогою різних інертних і оптично активних дисперсних добавок, що зміщують максимум спектра випромінювання дисперсного пального в область більш довгих хвиль або викликають локальну зміну спектра випромінювання в відповідних областях спектра. Встановлено, що введення добавок до базового складу дисперсного пального істотно не змінює динамічні характеристики суспензії, проте призводить до зниження температури (приблизно на  $100 \div 200^\circ\text{C}$  при наявності добавки до 25 % по масі) і до відповідного зміщення максимуму спектра випромінювання. Експериментально показана можливість істотної локальної модифікації спектра у жовтій області за допомогою неорганічних добавок до палива солей натрію з невисокою температурою розкладання (добавки  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). До значного збільшення світності полум'я в зеленій області спектра з максимумом випромінювання в діапазоні  $\Delta\lambda = 530 \div 580$  нм приводять добавки бору і з'єднань бору ( $\text{B}$ ,  $\text{AlB}_2$ ). Наведено світлотехнічні характеристики (сили світла, світлосумми) великих хмар ( $V \geq 10$  м<sup>3</sup>) сумішевих складів на основі алюмінієвої пудри ПАП-2. Встановлено, що введення неорганічних добавок до базового пального не призводить до помітної зміни світлотехнічних характеристик, але дещо збільшує час світіння хмари, як у видимій, так і в інфрачервоній частині спектру.

**Shevchuk V.G., Poletaev N.I., Starikov M.A., Shynharov G. L.**

## **The radiation properties of burning clouds of metal dust.**

### **3. Modification of the emission spectrum**

#### **SUMMURY**

*In this work we studied the emission spectra of the combustion products of low-volume dust clouds ( $V = 5$  L) from aluminum (ASD-4), as well as clouds from mixed compositions of aluminum with inorganic powdery oxidizing agents ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) and combustible (B,  $\text{AlB}_2$ , Cu). This article discusses the possibilities of purposeful modification of the emission spectrum of the base composition using various inert and optically active dispersed additives that shift the maximum of the emission spectrum of the fuel composition to the region of longer waves or cause a local change in the emission spectrum in the corresponding spectral regions.*

*In the course of the experiments, it was revealed that the introduction of additives into the basic composition of dispersed fuel does not significantly change the dynamic characteristics of the suspension. However, the additives lead to a decrease in temperature (by about 100–200°K in the presence of an additive up to 25% by weight) and to a corresponding shift in the maximum of the radiation spectrum.*

*The possibility of a significant local modification of the spectrum in the yellow region with the help of inorganic additives to the fuel of sodium salts with a low decomposition temperature (additives  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) was shown experimentally. Boron additives and boron compounds (B,  $\text{AlB}_2$ ) leads to a significant increase in the luminosity of the flame in the green region of the spectrum with a maximum radiation in the range  $\Delta\lambda = 530 \div 580$  nm. The article presents the lighting characteristics (luminous intensity, light sum) of large clouds ( $V \geq 10$  m<sup>3</sup>) of mixed compositions based on PAP-2 aluminum powder.*

*It was found that the introduction of inorganic additives to the base fuel does not lead to a noticeable change in the lighting characteristics, but somewhat increases the time of the cloud glow both in the visible and infrared parts of the spectrum.*

**Key words:** *burning metal clouds, spectral analysis, lighting characteristics of a flame, radio emission from burning clouds, thermionic dusty plasma*