

ФІЗИКА ГОРІННЯ

УДК: 621.791; 533.9

**Шевчук В.Г.¹, Полетаев Н.И.¹, Стариков М.А.², Нимич А.В.³,
Шингарёв Г.Л.⁴**

¹ Институт горения и нетрадиционных технологий, Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, ул. Дворянская 2, г. Одесса, Украина, 65026

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

³ Военная академия, ул. Фонтанская дорога 10, г. Одесса, Украина, 65026

⁴ НИИ физики, ОНУ им. И.И. Мечникова, ул. Дворянская 2, г. Одесса, Украина, 65026,
E-mail: incomb@ukr.net

Радиационные свойства горящих облаков металлической пыли.

2. Экспериментальные исследования

Экспериментально изучена динамика изменения во времени радиуса фронта пламени, температуры горения, радиационных характеристик (интегральный поток излучения в диапазоне $2\div 20$ мкм, сила света, удельная светосумма) горящих облаков металлической пыли (алюминий, алюмомагнийсый сплав, гидрид алюминия) объёмом более 10 м^3 . Показано, что излучательные характеристики больших облаков соответствуют таковым для малых объёмов ($V = 5$ л). Установлено, что максимальной силой света обладают аэровзвеси алюминия и гидрида алюминия, причем время их свечения в инфракрасной области превосходит времена свечения других составов. Несмотря на высокие светотехнические показатели аэровзвеси гидрида алюминия удельная светосумма таких аэровзвесей низкая, что обусловлено высокой скоростью их горения. Сравнение светотехнических показателей горящих облаков аэровзвеси металлических частиц с таковыми для фотосмесей в осветительных пиротехнических составах показывает, что силы света и удельные светосуммы аэровзвеси оказываются выше, чем у пиротехнических составов и примерно одинаковыми для фотосмесей. Однако продолжительность горения аэровзвеси обычно на два порядка больше, чем длительность вспышки фотосмеси, гораздо больше и объём источника излучения. Для облаков алюминия и магния впервые обнаружено существование шумоподобного радиочастотного излучения в диапазоне $1\div 40$ ГГц. Показано, что радиочастотный спектр имеет не тепловую природу, нелинейно зависит от частоты, а его общая энергоёмкость в указанном диапазоне составила величину порядка сотых долей Вт/м^3 . Проанализировано влияние тормозного излучения на характеристики радиоизлучения горящих облаков.

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

С использованием методики, изложенной в части 1 настоящей работы [1], проведены комплексные экспериментальные исследования динамики изменения радиуса зоны горения, скорости и температура пламени и оптико-спектральных характеристик горящих пылевых облаков. В исследованиях использовались рабочие порошки, дисперсные характеристики которых приведе-

Таблица 1. Характеристики рабочих порошко

Горючее	Марка	d_{10} , мм	d_{20} , мм	d_{30} , мм	Аппроксимация логнормальным законом		
					d_{50} , мкм	σ	ρ
Алюминий	АСД-1	7.80	10.7	12.03	5.20	0.930	0.998
Алюмомагниевого сплава (50–50)	АМД	3.92	5.34	7.20	2.46	0.848	0.998
	ПАМ-4	14.56	18.47	21.98	9.12	0.928	0.991
Гидрид алюминия	AlH_3	17.19	21.06	24.76	11.98	0.803	0.995
Алюминиевая пудра	ПАП-1	10÷30	-	-	-	-	-
	ПАП-2	<10÷30	-	-	-	-	-

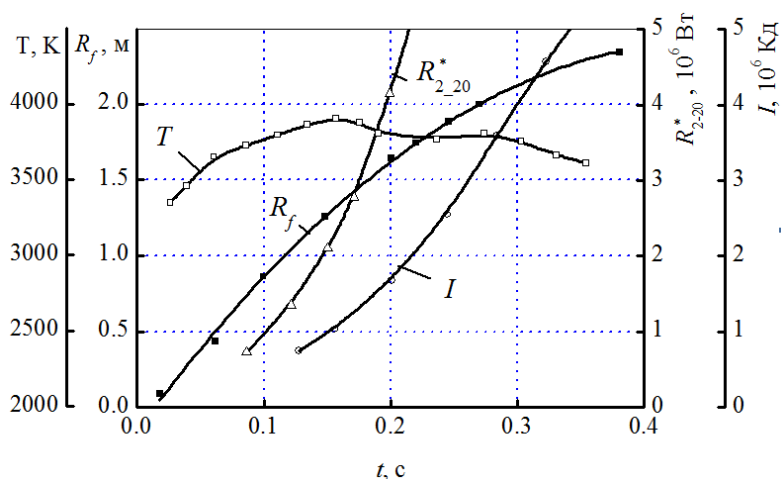


Рис.1 Динамика горения больших облаков аэрозвесей частиц алюминия $B = 270 \text{ г/м}^3$

ны в табл. 1. Здесь d_{50} – медианный диаметр, σ – параметр формы, ρ – коэффициент корреляции.

Серия натуральных опытов по исследованию излучательных характеристик горящих облаков объемом более 10 м^3 подразумевала получение информации о текущем радиусе фронта пламени $R_f(t)$, температуре горения $T(t)$, интегральном потоке излучения в диапазоне длин волн $2 \div 20 \text{ мкм}$ R_{2-20}^* со всей поверхности облака, силе света горящего облака I (см. рис.1).

Отметим, что условно весь процесс сгорания больших облаков аэрозвесей (см. рис. 2) можно разделить на три стадии: формирования облака, распространение пламени по облаку, образование и движение интенсивного термика. Приведенная на рис. 1 информация относится ко второй стадии – распространению пламени по облаку.

Прежде всего отметим, что температура горения, интегральная светимость $R = \varepsilon_{Al} \sigma T^4$ (для алюминия эффективный коэффициент черноты $\varepsilon_{Al} \approx 0.05$) и интегральные потоки излучения с единицы поверхности облака R_{2-20} (например для АСД-1 при концентрации горючего $B = 250 \text{ г/м}^3$ светимость $R_{2-20} = (15.5 \pm 2.5) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, при концентрации $B = 450 \text{ г/м}^3$ $R_{2-20} = (14.5 \pm 3.3) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$) близки к таковым, получаемым в условиях малообъемных облаков объемом

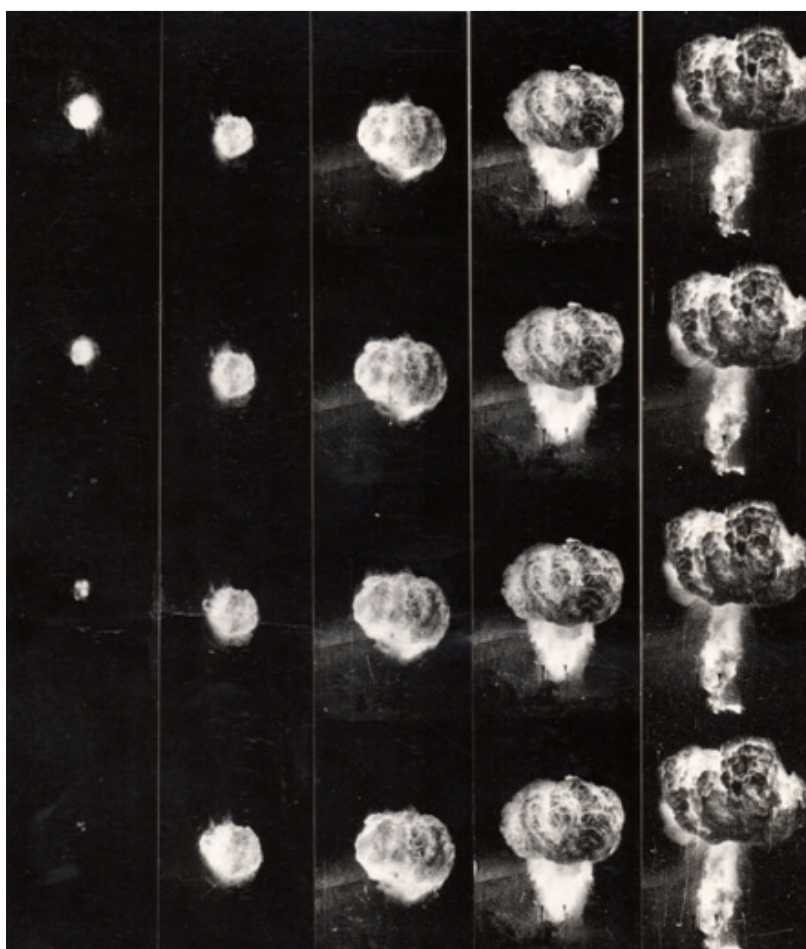


Рис.2. Кинограмма процесса горения аэровзвеси АСД-1

Таблица 2. Светотехнические характеристики горящих пылевых облаков

Горючее	Масса состава, кг	Время свечения до I_{max} , с	Время свечения до $0,1 I_{max}$ 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
АСД-1	4.8	0.28	2.0	3.9	7.7	3.2
АСД-1	2.3	0.26	1.4	3.8	4.5	2.8
ПАМ-4	4.6	0.14	1.2	3.2	3.0	0.8
АМД	7.8	0.10	1.4	2.5	2.5	0.5
АИ ₃	5.3	0.06	0.6	1.6	7.9	0.7
ПАП-2	1.8	0.08	0.6	1.6	7.8	2.6

$5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ [2]. Это позволяет сделать выводы, во-первых, о правомерности использования оптико-спектральных характеристик получаемых в лабораторных малообъёмных условиях для прогнозирования таковых в крупномасштабных ситуациях. Во-вторых, что сам излучатель можно считать оптически толстым. Последний вывод основывается на отсутствии зависимости R_{20} от размеров излучателя.

Итоговые результаты для горящих пылевых облаков приведены в табл. 2. Удельная светосумма L определялась интегрированием силы света $I(t)$ за полное время свечения пламени в видимой и инфракрасной области отнесенной к массе исходного образца горючего.

Как видно из таблицы, максимальные значения силы света для всех испытанных составов близки и имеют порядок $10^6 \div 10^7$ Кд. Максимальной силой света обладают аэровзвеси алюминия и гидрида алюминия, причем время их свечения в ИК области превосходят времена свечения других составов. Испытания аэровзвеси гидрида алюминия показали, что, несмотря на высокие светотехнические показатели, удельная светосумма таких аэровзвесей низкая, что обусловлено высокой скоростью их горения. Отметим также, что порошки алюминиевой пудры хорошо хранятся и распыляются, а также обладают стабильными светотехническими параметрами.

Сравнение светотехнических показателей горящих облаков аэровзвеси металлических частиц с таковыми для фотосмесей в осветительных пиротехнических составов [3] показывает, что силы света и удельные светосуммы аэровзвеси оказываются выше, чем у пиротехнических составов. Что касается фотосмесей, то светотехнические показатели их примерно одинаковы с аэровзвесями. Однако продолжительность горения аэровзвеси обычно на два порядка больше, чем длительность вспышки фотосмеси, гораздо больше и объём источника излучения. Такой эффект достигается исключительно спецификой организации сжигания аэровзвеси: горючее сначала распыляется, а затем происходит его зажигание.

Для проверки возможности генерации радиочастотного излучения горящими пылевыми облаками нами предпринят цикл экспериментальных исследований, преследующих цель установить сам факт наличия такого излучения, а также, по возможности, выявить характер спектрального распределения энергии в радиочастотном диапазоне. Опыты проводились по методике, описанной в части I-й [1], на установке, использующей вышибной способ создания облака и безэлектродный способ его зажигания продуктами сгорания вышибного заряда. Испытания аэровзвеси магния МПФ-4 и алюминиевой пудры ПАП-1. При этом скорости распространения пламени оказались приблизительно вдвое меньшими, по сравнению с центральным поджогом, что обусловлено зажиганием облака у его нижней кромки.

Сигнал регистрировался пятью радиоприёмными устройствами на резонансных частотах 0,8; 5; 7;10;40 ГГц. Антенны работали по схеме прямого усиления и имели примерно равные характеристики как по полосе пропускания (относительно рабочей частоты), так и по коэффициенту передачи, а также характеристикам диаграммы направленности. Исключением являлась антенна дециметрового диапазона, имеющая бóльшую добротность и более широкую диаграмму направленности вследствие своей конструкции (параболической формы). Регистрируемые антеннами сигналы усиливались пятью идентичными усилителями с коэффициентом усиления 10^5 и записывались шлейфовым осциллографом.

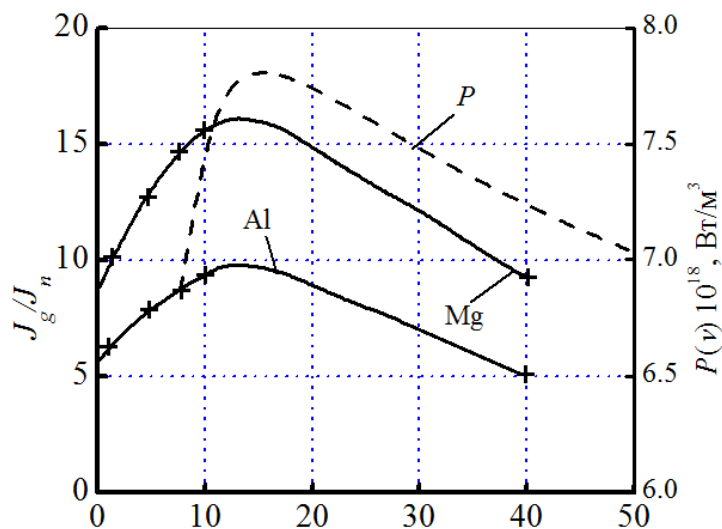


Рис.3. Спектральная интенсивность излучения пламени в радиочастотном диапазоне. Сплошная линия – эксперимент; пунктирная линия – расчёт спектра тормозного излучения наноразмерных частиц окиси магния ($T_e = 2600$ К, $n_i = 5 \cdot 10^{16}$ м⁻³, $Z_i = 6$, $n_e = Z_i n_i$ [5]).

На рис. 3 приведена зависимость относительной спектральной плотности энергии излучения J_g/J_n (энергии излучения, нормированной по отношению к собственному шуму приёмного устройства) от частоты ν .

Регистрируемый сигнал имел шумоподобную форму, определялось отношение интенсивности шума регистрируемого сигнала к таковому в исходном состоянии для каждой антенны. После усреднения данных по каждому радиоприёмному каналу были получены зависимости спектральной плотности энергии излучения и интегральная мощность излучения (W) горячей аэровзвеси (рис.3.)

Излучение горящих облаков в радиочастотном (РЧ) диапазоне может иметь разнообразные причины. К основным из них можно отнести тепловое излучение в радиочастотном диапазоне, плазменные колебания электронной компоненты, ускоренное движение электронов в поле ионов и заряженных оксидных частиц (тормозное и рекомбинационное излучение). Оценки показали, что при температурах горения газовой взвеси 2500÷3000К энергетический выход теплового излучения в диапазоне 0÷50 ГГц ($W \leq 10^{-5}$ Вт/м³) на несколько порядков меньше измеренного значения ($W \sim 0.02$ Вт/м³). Кроме этого предположение о тепловой природе излучения не позволяет объяснить форму зарегистрированного РЧ спектра (с экстремумом).

Хорошее качественное согласие с экспериментом дает гипотеза о тормозной природе РЧ излучения (рис.3). Зависимость спектральной мощности тормозного излучения $P(\nu)$ [4] рассчитана в предположении о применимости теории газовой плазмы для термоэмиссионной двухкомпонентной электронно-пылевой плазмы, в которой частицы конденсированной фазы рассматриваются как многозарядные ионы.

$$\frac{dP}{d\omega} = \frac{8\sqrt{2}}{3\sqrt{\pi}} \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right]^3 \frac{1}{(m_e c^2)^{3/2}} \left[1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2} \right] \frac{Z_i^2 n_i n_e}{(k_B T_e)^{1/2}} E(y) \quad (1)$$

Формула (1) справедлива при $\hbar\omega \ll k_B T_e$, где \hbar , k_B – постоянные Планка и Больцмана, T_e – температура электронов. В (1) приняты обозначения: $\omega_e = (n_e e^2 / \varepsilon_0 m_e)^{1/2}$ – плазменная частота электронов, n_e – концентрация электронов, n_i и Z_i – концентрация и зарядовое число ионов.

Для $y = \frac{1}{2} \left[\frac{\hbar\omega}{k_B T_e} \right] \ll 1$ [4] $E(y) \approx -\ln|ye^\gamma|$ ($\gamma = 0.577$ – постоянная Эйлера-

Маскерони); e , m_e , c , ε_0 – физические константы.

Однако рассмотренный механизм излучения плазмы продуктов сгорания Mg и Al в диапазоне частот ($\omega_e / 2\pi \div 50$) ГГц дает на несколько порядков величины более низкие интегральные потоки излучения ($W \sim 10^{-5}$ Вт/м³), чем полученные в эксперименте ($W \sim 10^{-2}$ Вт/м³). Поэтому, для определения механизма генерации и спектральных характеристик радиочастотного излучения в горящих пылевых облаках металлов, требуется проведение дополнительных исследований.

Заключение. Приведены результаты экспериментальных исследований оптико-спектральных и светотехнических характеристик излучения больших ($V > 10$ м³) облаков металлических горючих, которые позволили установить следующее:

1. Излучательные характеристики больших облаков соответствуют таковым для малых объёмов ($V = 5$ л). Максимальной силой света обладают аэровзвеси алюминия и гидрида алюминия.

2. Светотехнические показатели горящих облаков аэровзвеси металлических частиц выше, чем у пиротехнических составов и примерно одинаковыми с показателями для фотосмесей. Продолжительность горения аэровзвеси обычно на два порядка больше, чем длительность вспышки фотосмеси.

3. Для облаков алюминия и магния впервые обнаружено существование шумоподобного радиочастотного излучения в диапазоне 1÷40 ГГц. Показано, что радиочастотный спектр имеет не тепловую природу, нелинейно зависит от частоты, а его общая энергоёмкость в указанном диапазоне составила величину порядка сотых долей Вт/м³.

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., Кондратьев Е.Н., Золотко А.Н., Смирнов В.В. О режимах распространения пламени в аэровзвесах металлических частиц. // Физика горения и взрыва. – 1982. – Т.18, №5. – С. 70-76.
3. Шидловский А.А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973, – 320 с.
4. G. Bekefi. Radiation Processes in Plasmas, Wiley, 1st edition, (1966), 377 p.
5. Флорко А. В., Козицкий С. В., Золотко А. Н., Головки В. В. Механизм переноса конденсированных продуктов сгорания на поверхность горячей частицы магния // Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 19. – №6, – С. 24-29.

Shevchuk V.G., Poletaev N.I., Starikov M.A., Nimich A.V., Shynharov G.L.
Radiation properties of burning clouds of metal dust.
2. Experimental research

SUMMARY

The dynamics of the time variation of the flame front radius, combustion temperature, and radiation characteristics (integrated radiation flux in the range of 2–20 μm , luminous intensity, specific light sum) of burning clouds of metal dust (aluminum, aluminum-magnesium alloy, aluminum hydride) with a volume of more than 10 m³ was experimentally studied. It is shown that the radiative characteristics of large clouds correspond to those for small volumes ($V = 5$ L). It has been established that aerosuspensions of aluminum and aluminum hydride have the maximum luminous intensity, and the time of their luminescence in the infrared region exceeds the luminescence times of other compositions. Despite the high lighting performance of aluminum hydride aerosuspensions, the specific light sum of such air suspensions is low, due to their high burning rate. A comparison of the lighting performance of burning clouds of aerosuspension of metal particles with those for photo mixtures in lighting pyrotechnic compositions shows that the luminous intensities and specific light sums of air suspension are higher than those of pyrotechnic compositions and approximately the same for photo mixtures. However, the duration of combustion of an aerosuspension is usually two orders of magnitude longer than the duration of the flash of the mixture, much more than the volume of the radiation source. For clouds of aluminum and magnesium, the existence of noise-like radio-frequency radiation in the range 1–40 GHz was first discovered. It was shown that the radio-frequency spectrum is not of a thermal nature, non-linearly dependent on frequency, and its total energy intensity in the indicated range was of the order of hundredths of a W/m^3 . The influence of bremsstrahlung on the radio emission characteristics of burning clouds was analyzed.

Шевчук В. Г., Полетаєв М. І., Старіков М. А., Німич А. В., Шингарьов Г.Л.
Радіаційні властивості хмар металічного пилу, що горить.
2. Експериментальні дослідження

АНОТАЦІЯ

Експериментально вивчено динаміку зміни в часі радіусу фронту полум'я, температури горіння, радіаційних характеристик (інтегральний потік випромінювання в діапазоні 2 ÷ 20 мкм, сила світла, питома світлосума) палаючих хмар металевого пилу (алюмінію, алюмомагнієвий сплав, гідрид алюмінію) об'ємом більше 10 м³. Показано, що випромінювальні характеристики великих хмар відповідають таким для малих об'ємів ($V = 5$ л). Встановлено, що максимальну силу світла мають аерозависи алюмінію і гідриду алюмінію, причому час їх світіння в інфрачервоній області перевершує часи світіння інших металів. Незважаючи на високі світлотехнічні показники аерозависів гідриду алюмінію питома світлосума таких аерозависів низька, що зумовлено високою швидкістю їх горіння. Порівняння світлотехнічних показників палаючих хмар аерозависів металевих частинок з такими для фотосуміші в освітлювальних піротехнічних складах показує, що сили світла і питомі світлосуми аерозависів виявляються вищими, ніж у піротехнічних складів і приблизно однаковими для фотосуміші. Однак тривалість горіння аерозависів зазвичай на два порядки більше, ніж тривалість спалаху фотосуміші, набагато більший і об'єм джерела випромінювання. Для хмар алюмінію і магнію вперше виявлено існування шумоподібного радіочастотного випромінювання в діапазоні 1–40 ГГц. Показано, що радіочастотний спектр має нетеплову природу, нелінійно залежить від частоти, а його загальна енергоємність в зазначеному діапазоні склала величину порядку сотих $\text{Вт}/\text{м}^3$. Проаналізовано вплив гальмівного випромінювання на характеристики.