

**Материалы лекций
Дудырева А. С.,
«Разработка пиротехнических составов»
Переработали и оформили
Е. Мисоночникова, Королев Д. В.
использованы материалы лекций
нескольких лет**

Классификация пиротехнических составов по типу используемого эффекта.

I. Образование пламени при горении.

1. Осветительные составы. Используются в следующих изделиях: реактивные 30-мм патроны, 82-мм осветительные мины, 130-мм осветительные снаряды, 26-мм осветительные патроны для ракетниц, осветительные авиабомбы.
2. Сигнальные составы. Используют эффект цветного пламени.
3. Трассирующие составы.
4. Составы ИК-излучения.
5. Фейерверки.
6. Зажигательные составы.

II. Образование дыма (тумана).

1. Маскирующие дымы.
2. Сигнальные дымы.
3. Экранирующие составы. Поглощают тепловое излучение и малые радиоволны.
4. Противораковые средства.
5. Инсектицидные.

III. Выделение тепла.

IV. Выделение газа.

V. Равномерное перемещение фронта горения.

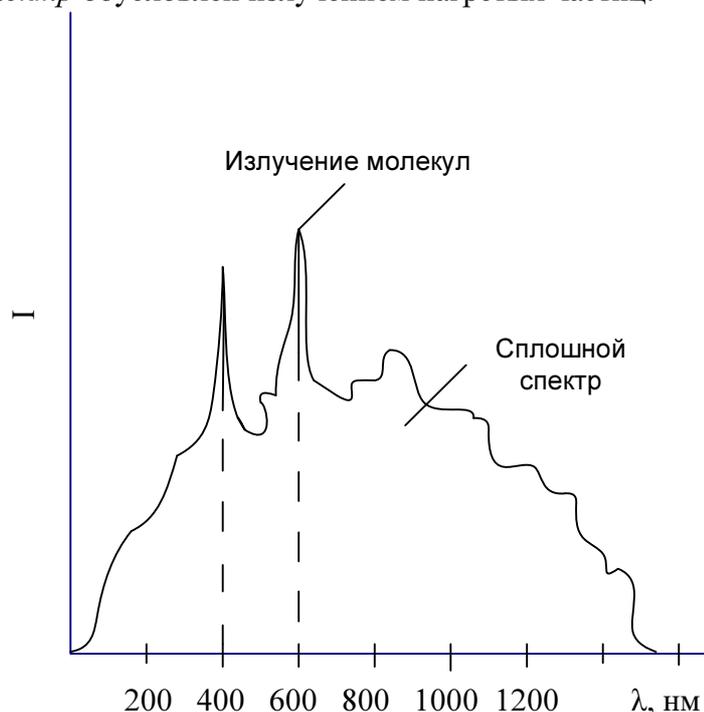
Излучение пламён пиротехнических составов.

Пламя является широкополосным источником излучения, в нём обнаруживаются все возможные спектры излучения.

Линейчатый спектр излучения обусловлен излучением атомов в газообразном состоянии или ионов. Валентный электрон переходит на более высокий уровень, а затем возвращается обратно, это сопровождается выделением кванта света определённой длины волны, т.е. атом даёт одну линию спектра.

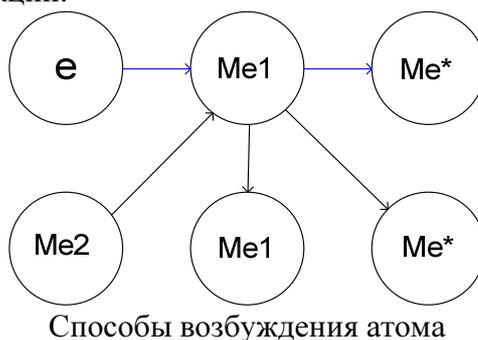
Полосатые спектры обусловлены излучением молекул. Многочисленные линии в спектре обусловлены колебанием и вращением молекул.

Сплошной спектр обусловлен излучением нагретых частиц.



Атомарное излучение по своей силе значительно превосходит любые другие источники излучения и мало зависит от температуры и давления окружающей среды. Чтобы добиться атомарного излучения, температура пламени должна составлять около 10000°C , однако, реальная температура в пламенах пиротехнических составов находится в диапазоне $2500\text{-}3000^{\circ}\text{C}$. С другой стороны, возбуждение атомов в пламени может происходить не термическим путём, а в силу протекания различных химических реакций, которые сопровождаются образованием атомов в возбужденном состоянии. Это явление называется *хемолюминесценцией*.

Люминесценция – свечение, которое может наблюдаться под действием прохождения электрического тока, при бомбардировке вещества электронами и другими заряженными частицами, а также при воздействии рентгеновского излучения и в результате химических реакций.

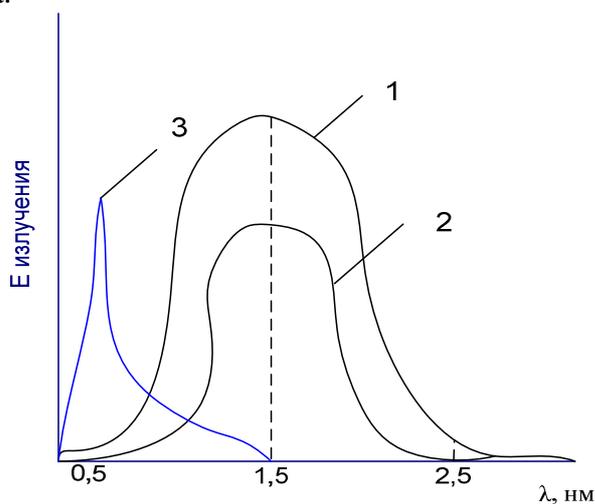


Столкновение атомов с перераспределением скоростей, не сопровождающееся свечением, называют *тушащим*.

В качестве конденсированных веществ в пламени источниками сплошного спектра являются:

1. Недоокисленные частицы горючего.
2. Оксиды металлов (продукты окисления горючего, продукты разложения окислителя).

Существуют особые твёрдые частицы – селективные излучатели, которые при определенной длине волны дают энергию излучения, которая превосходит энергию абсолютно чёрного тела.



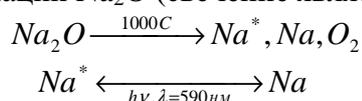
Излучение различных частиц:

- 1 – абсолютно чёрное тело;
- 2 – серый излучатель;
- 3 – селективный излучатель.

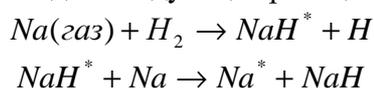
Добиться излучения атомов, а тем более молекул пиротехническими пламенами невозможно.

Рецептура	КБ	Цвет пламени	Продукты сгорания
$\begin{cases} NaNO_3 \\ Mg \end{cases}$	+10	Интенсивно жёлтый	MgO, N ₂ , Na, Na ₂ O
$\begin{cases} NaNO_3 \\ Mg \end{cases}$	0	Жёлтый оттенок	MgO, N ₂ , Na, следы Na ₂ O
$\begin{cases} NaNO_3 \\ Mg \end{cases}$	-10	Белый	MgO, Mg(газ), N ₂ , Na
$\begin{cases} NaNO_3 \\ Mg \\ \text{Идитол} - 5/100 \end{cases}$	-10	Жёлтый	MgO, Mg(газ), N ₂ , Na (газ); CO, CO ₂ , H ₂

В первом случае наблюдаемое явление изменения цвета пламени обусловлено химическим процессом диссоциации Na₂O (свечение является хемолюминесцентным):



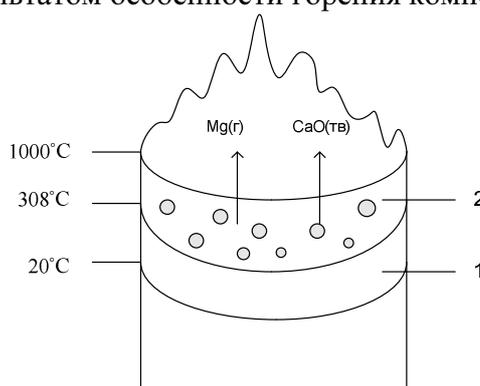
В четвёртом случае происходит следующая реакция:



Таким образом, к числу хемолюминесцентных реакций можно отнести реакцию рекомбинации атомов водорода на поверхности атома натрия. Возможно возбуждение атомарного натрия в результате образования гидроида с последующей диссоциацией.

Рецептура	КБ	Цвет пламени
$\begin{cases} NaNO_3 \\ Mg \\ CaO - 3/100 \end{cases}$	0	Жёлтый

Иногда причины изменения цвета пламени обусловлены не реакциями возбуждения атомов, а результатом особенности горения композиции.



Механизм горения композиции NaNO₃ – Mg – CaO

1 – подготовительный слой;

2 – РЗКФ (расплав NaNO₃, газообразный Mg, частицы CaO)

Рецептура	КБ	Цвет пламени
$\begin{cases} Ba(NO_3)_2 \\ Mg \end{cases}$	+10	Жёлто-оранжевый оттенок
	0	Зеленоватый оттенок
	-10	Белый

ВаО, являясь молекулой, в нагретом состоянии даёт полосатый спектр излучения, но ни одна линия не находится в зелёной области (500-550 нм), поэтому нитрат бария широко применяют для разработки осветительных и сигнальных составов белого цвета пламени.

Рецептура	КБ	U, мм/с	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г	C, Лм/Вт	Цвет пламени	T _{расч} , К	T _{эсп} , К
$\left\{ \begin{array}{l} NaClO_4 \\ Mg \end{array} \right.$	0	2,1	33	55	Жёлтый	3100	2600
	-20	2,6	46	60	Жёлтый	4200	2700
$\left\{ \begin{array}{l} KClO_4 \\ Mg \end{array} \right.$	0	1,7	15	18	Белый с фиолетовым оттенком	2700	2700
	-20	3,5	13	16		2700	2700

U – линейная скорость горения;

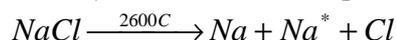
L – удельная светосумма (учитывает массу заряда, время свечения и силу излучения);

C – световая отдача (характеризует, какое количество энергии выделяется в виде светового излучения по отношению к суммарному запасу энергии состава. Под суммарным запасом энергии можно понимать теплоту сгорания состава).

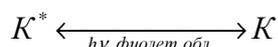
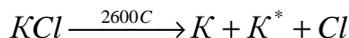
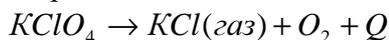
1 лм – световой поток, создаваемый источником с силой света 1 Кд в телесном угле 1 стерадиан;

T_{расч} – расчётная температура горения, К;

T_{эсп} – экспериментально полученная температура горения, К.

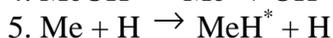
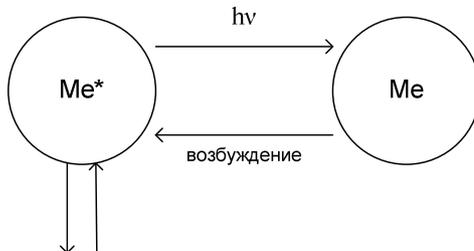


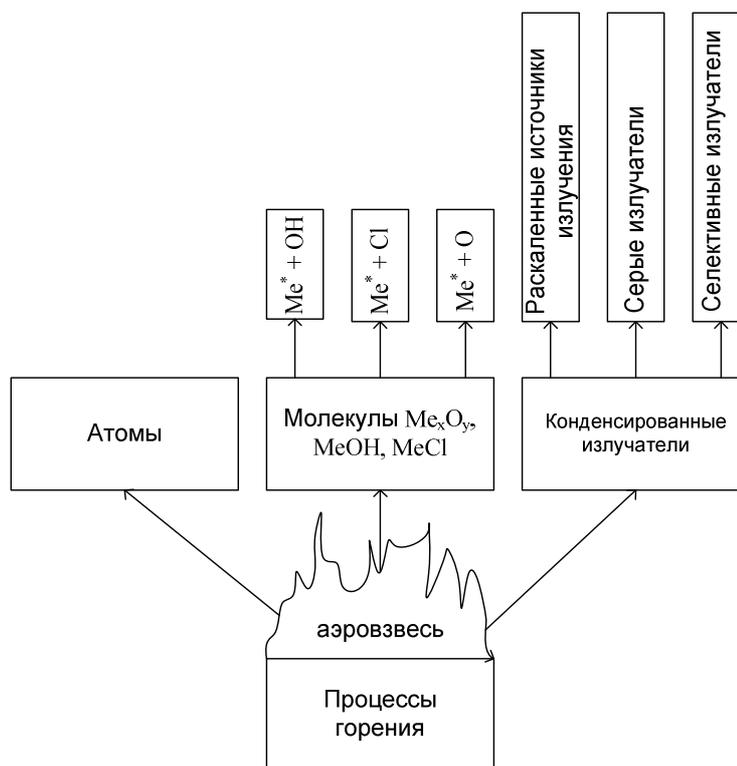
Таким образом, одним из возможных вариантов появления атомарного излучения является реакция диссоциации хлоридов.



Именно поэтому перхлорат, а также нитрат калия никогда не применяются в качестве окислителей в осветительных составах.

Атомарное излучение является наиболее сильным, и тот факт, что оно превосходит излучение, полученное под действием тепла, показывает, что в пламени излучение люминесцентное. Молекулы в газообразном состоянии в пламенах пиротехнических составов в силу их большей массы, чем масса отдельных атомов, тем более никогда не могут не перейти в возбуждённое состояние при температуре пламени. Тем не менее, излучение присутствует, следовательно, природа его является люминесцентной и обусловлена протеканием химических реакций в пламенах.





Измерение температуры пламени

Температуру пламени экспериментально определяют с использованием приборов, регистрирующих либо суммарное энерговыделение, либо излучение в конкретно заданном диапазоне длин волн, либо применяют измерение спектральными методами для конкретных участков пламени.

Для измерения температуры пламен пиротехнических составов возможно применение *термопар*, но получаемые результаты нельзя признать достоверными в силу того, что при введении термопары в пламя могут наблюдаться химические процессы на ее поверхности. Мало того, на нагрев термопары требуется время, т.е. она является инерционной.

Радиационный пирометр регистрирует всю энергию излучения:

$$E_{изл} = E_{видим.обл.} + E_{ИК} + E_{УФ}$$

Виды регистрируемой температуры:

1. Радиационная температура (T_p) – температура такого чёрного тела, излучение которого совпадает с излучением исследуемого тела.

$$E_{изл} = \sigma T_p^4 = \epsilon_\lambda \sigma T_u^4$$

ϵ_λ - степень черноты тела;

σT_p^4 - источник излучения АЧТ;

$\epsilon_\lambda \sigma T_u^4$ - источник излучения исследуемого тела.

$$T_u = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon_\lambda}}$$

$$T_u > T_{пАЧТ}$$

2. Яркостная температура источника излучения (T_λ) – это температура абсолютно чёрного тела, интенсивность излучения которого при определенной длине волны равна интенсивности излучения источника при данной длине волны.

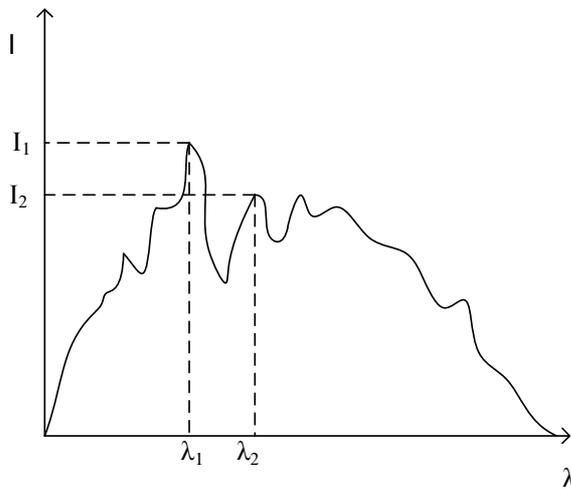
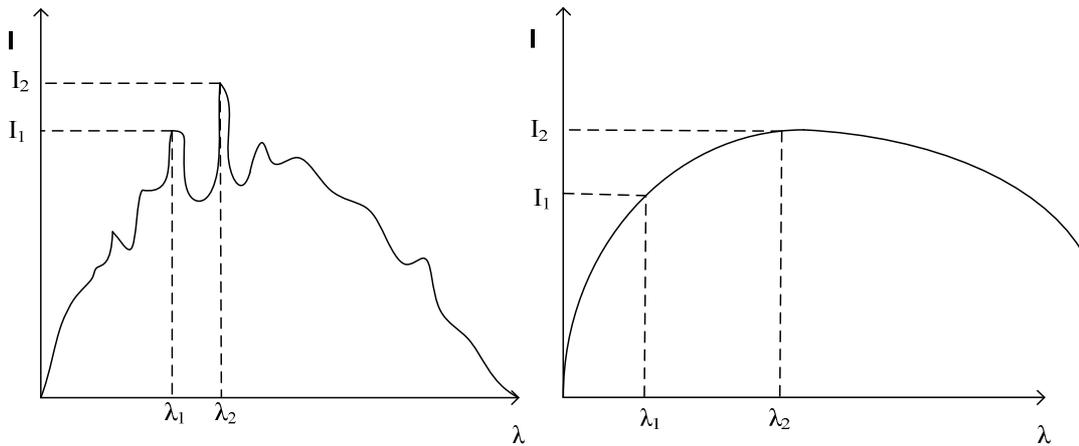
$$\frac{1}{T_я} - \frac{1}{T_u} = \frac{\lambda}{C_2} \ln\left(\frac{1}{\epsilon_\lambda T_u}\right)$$

$C_2 = 1,43 \cdot 10^{-2}$ м/К – рассчитывается из формулы Планка.

$$T_u > T_{яАЧТ}$$

3. Цветовая температура тела (T_u) – температура такого абсолютно чёрного тела, которое имеет распределение энергии в спектре наиболее близкое к распределению энергии источника излучения при данной температуре.

$$\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_u} = \frac{\ln(\epsilon_1/\epsilon_2)}{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}$$



При $E_1 = E_2$ $T_u < T_u$
 При $E_1 > E_2$ $T_u < T_u$
 При $E_1 < E_2$ $T_u > T_u$

Разработка осветительных составов

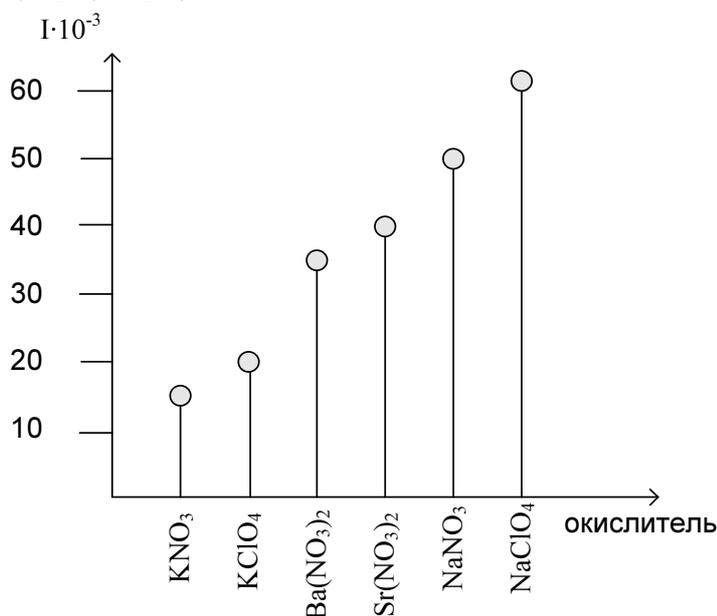
Выбор горючих

Металлические горючие:

1. МПФ: Mg-I, Mg-II, Mg-III, Mg-IV. $T_{пл} = 650^{\circ}\text{C}$, $T_{кип} = 1200^{\circ}\text{C}$.
2. Al: Al-I, Al-II, Al-III, Al-IV, Alпш (пудра пигментная), АСД-I, АСД-II, АСД-III, АСД-IV. $T_{пл} = 650^{\circ}\text{C}$, $T_{кип} = 2500^{\circ}\text{C}$.
3. АМ (сплав алюминия и магния): АМ-I, АМ-II, АМ-III, АМ-IV. Использование требует специальных подходов в разработке, в противном случае горение будет пульсирующим с частотой 1-20 Гц, что заметно человеческому глазу.

Выбор окислителей

1. Нитраты: KNO_3 , NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$
2. Хлораты: KClO_3 , NaClO_3
3. Перхлораты: KClO_4 , NaClO_4
4. Оксиды: BaO , K_2O , Na_2O , SrO



Характеристики двухкомпонентных смесей Mg + Ox при КБ = 0
(диаметр 23 мм, оболочка бумажная, $K_{уп} = 0,85$)

Требования к осветительным составам

1. Пламя по спектральному составу должно быть подобно спектральному составу солнечного света.
2. Высокая сила света.
3. Мощный световой поток.
4. По возможности низкие линейные скорости горения.
5. Максимальное значение удельной светосуммы.
6. Большие размеры пламени.
7. Высокая химическая стойкость.

Нитрат калия и перхлорат натрия не удовлетворяют требованиям, т.к. их излучение лежит не в видимой области спектра. Нитрат стронция не подходит из-за того, что дает

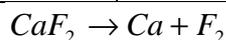
оранжевый оттенок. Нитрат натрия и перхлорат натрия почти в два раза превышают нитрат бария по силе света, но перхлорат натрия химически неустойчив.

Осветительные составы на основе нитрата бария

Рецептура	Соотношение компонентов	U, мм/с	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г
$\left\{ \begin{array}{l} Ba(NO_3)_2 \\ Mg \end{array} \right.$	45/45	2,3	23
$\left\{ \begin{array}{l} Ba(NO_3)_2 \\ Mg \end{array} \right.$	45/45 + 10 AlIII	2,2	15
$\left\{ \begin{array}{l} Ba(NO_3)_2 \\ AM \end{array} \right.$	45/55	2,3	10

Характеристики осветительных составов на основе нитрата бария невысоки, алюминий как добавка особого вклада не вносит, лишь несколько повышает яркость пламени.

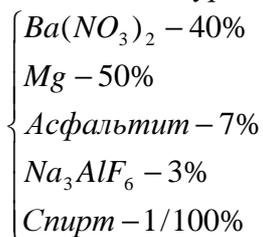
Рецептура	%	U, мм/с	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г
$\left\{ \begin{array}{l} Ba(NO_3)_2 \\ Mg \\ CaF_2 \end{array} \right.$	50 50 5/100	4,4	40



Рецептура	%	U, мм/с	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г
$\left\{ \begin{array}{l} Ba(NO_3)_2 \\ Mg \\ \text{Идитол} \end{array} \right.$	50 50 10/100	4,0	28-30
$\left\{ \begin{array}{l} Ba(NO_3)_2 \\ Mg \\ \text{Стеарат _ кальция} \end{array} \right.$	50 50 10/100	2,5	30-35

Таким образом, используя двухкомпонентную смесь нитрата бария и магния, можно увеличить излучательные характеристики за счёт селективных излучателей или за счёт введения органических соединений.

Рецептура штатного состава:



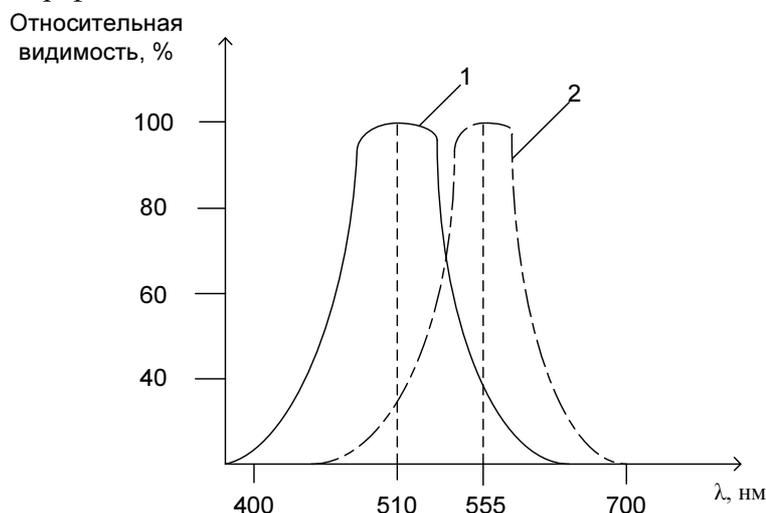
30-мм реактивный патрон: $L = 20000$ Кд·с/г, $I = 100000$ Кд;

40-мм парашютный патрон: $L = 20000$ Кд·с/г, $I = 140000$ Кд.

Осветительный состав для снаряжения осветительной парашютной мины:

$$\left\{ \begin{array}{l} Ba(NO_3)_2 - 70\% \\ Mg - 14\% \\ Al_m - 13\% \\ Олифа - 3\% \end{array} \right.$$

$U = 1,5$ мм/с, диаметр факела 54 мм, $I = 150000$ Кд.



Относительная видимость зеленого цвета:

- 1 – при ночных условиях;
- 2 – при дневных условиях.

Достоинства:

1. Нитрат бария легко изготовляем, негигроскопичен, практически нерастворим в воде.
2. Двухкомпонентная смесь нитрата бария и магния обладает низкими скоростями горения (2-4 мм/с).

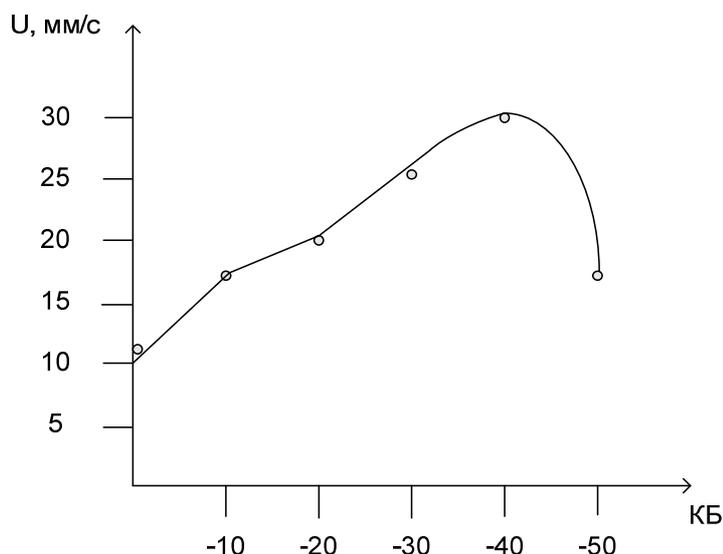
Цвет	Диапазон, нм	Доминирующая длина волны $\lambda_{дом}$, нм
Синий	400-500	470
Зелёный	500-550	530
Жёлтый	550-600	596
Красный	600-700	630

Таким образом, зелёный оттенок пламени соответствует особенностям ночного зрения человека, а с учётом зелёного цвета растительности любые предметы наблюдаются более реально.

Осветительные составы на основе нитрата натрия

На основе нитрата натрия могут быть разработаны наиболее мощные осветительные средства с наиболее мощными светотехническими характеристиками, что обусловлено атомарным излучением в пламенах.

Основные проблемы нитрата натрия – это гигроскопичность и высокая скорость горения составов на его основе.



Зависимость скорости горения от КБ для смеси магний – нитрат калия

Добавка	U, мм/с	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г
Без добавки	26	20
Стеариновая кислота	5	80
Стеарат натрия	8	60
Идитол	13	35
Парафин	23	30
Фталевая кислота	16	35

Поскольку снижение скорости горения происходит за счёт отбора тепла из РЗКФ на нагрев и испарение (разложение) добавок, наиболее эффективно применять в качестве добавок стеарин или стеарат натрия. Это объясняется тем, что указанные вещества имеют чётко выраженные температуры испарения. Остальные приведенные вещества относятся к числу соединений, которые плавятся, но при нагреве выше температуры плавления разлагаются.

Для снижения скорости горения магний можно обрабатывать лаками, спиртовым раствором канифоли, фторкаучуками или кремнийорганическими соединениями. Для увеличения удельной светосуммы используются добавки селективных излучателей CaF_2 , MgO , CaO .

Рецептура	КБ	Добавка 7/100%	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г
$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaNO}_3 \\ \text{Mg} \end{array} \right.$	-30	Без добавки	26
		CaF_2	80
		MgO	65
		CaO	40

Состав для 75-мм осветительного парашютного снаряда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaNO}_3 - 32\% \\ \text{Mg} (\text{обработанный } 6\% \text{ парафина}) - 66\% \\ \text{Графит} - 2\% \end{array} \right.$$

$$U = 4 \text{ мм/с}, I = 3,2 \text{ млн. Кд.}$$

Термостойкий состав:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaNO}_3 - 44\% \\ \text{Mg} - 45\% \\ \text{MgCO}_3 - 2\% \\ \text{CaF}_2 - 3\% \\ \text{ФП} - 4 - 2\% \\ \text{ЛакФК} - 260\text{Л} - 2\% \end{array} \right.$$

Осветительные составы на основе перхлората натрия

Главная проблема заключается в том, композиции на основе $\text{NaClO}_4 + \text{Mg}$ относятся к категории химически нестойких составов, что объясняется гигроскопичностью перхлората натрия. Накапливая воду, перхлорат натрия образует анионную плёнку ClO_4^- , которая снижает активность магния практически до нуля. Хранить подобные составы больше месяца нельзя. Для избежания воздействия анионной плёнки на магний его никелируют. Также применяют нитрат натрия в качестве стабилизатора химической стойкости.

К числу достоинств смесей на основе перхлората натрия и магния можно отнести приемлемую скорость горения. При КБ = -30 уплотнённая двухкомпонентная смесь $\text{NaClO}_4 + \text{Mg}$ горит со скоростью 5 мм/с, при этом удельная светосумма составляет порядка 46 000 Кд·с/г. Таким образом, можно сделать вывод, что светотехнические характеристики композиций на основе перхлората натрия имеют достаточно высокие значения.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaClO}_4 - 16\% \\ \text{Mg} - \text{II} - 75\% \\ \text{CaO} - 9\% \end{array} \right. \quad L = 110\,000 \text{ Кд·с/г}$$

Характеристики испытания двухкомпонентной смеси $\text{NaClO}_4 + \text{Mg}$ при КБ = -30
(диаметр 23 мм, оболочка бумажная)

Добавка	U, мм/с	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г
Без добавки	5	46
Стеарин 3/100	5,6	50
Стеарин 5/100	3,5	65
Парафин 5/100	5,5	55
Идитол 3/100	7,5	40
Идитол 7/100	4,8	45

Стоит обратить внимание на то, что при введении в композицию органических добавок в небольшом количестве (3% и менее) наблюдается явление увеличения скорости горения, при этом, чем меньше содержание добавки, тем больше возрастает скорость. Так, например, при введении 1% парафина скорость горения возрастает до 9 мм/с.

Для перхлоратных композиций (на основе NaClO_4 , KClO_4 , LiClO_4 , NH_4ClO_4) введение органических добавок в небольших количествах увеличивает скорость их разложения вплоть до взрывного горения. При незначительных добавках органики в чистые перхлораты последние способны разлагаться со взрывом при механических воздействиях.

Влияние неорганических добавок на смесь $\text{NaClO}_4 + \text{Mg}$ при КБ = -40

Добавка	U, мм/с	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г
Без добавки	6,5	40
CaO 2/100	7,9	92
MgO 5/100	5,3	63
Al_2O_3 5/100	6	61
ThO_2 5/100	6,6	56
CaF_2 5/100	6,2	87
CaF_2 10/100	5,3	81
AlF_3 5/100	3,5	75
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 5/100	8,8	90

Из органических добавок чаще всего используют стеарин и стеараты, например, стеарат кальция. Некоторые неорганические добавки (оксиды металлов переменной валентности) способны вызывать каталитическое разложение перхлоратов.

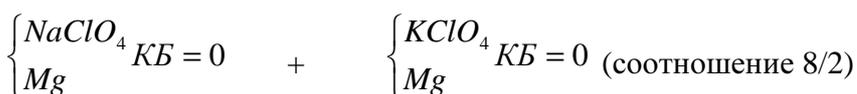
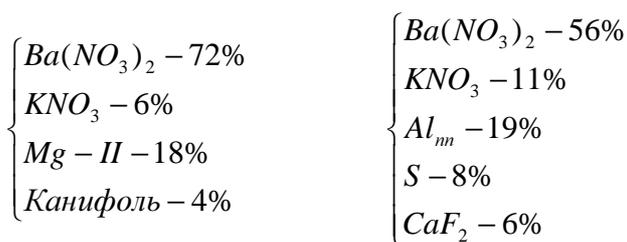
Составы для снаряжения осветительных приборов

Рецептура	U, мм/с	Диаметр факела, мм	$I \cdot 10^{-6}$ Кд	Изделие
$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaClO}_4 - 25\% \\ \text{NaNO}_3 - 25\% \\ \text{Mg} - 42\% \\ \text{СтеаратCa} - 4\% \\ \text{Спиртовой}_p - p_ \text{канифоли} - 3\% \\ \text{Индустриальное}_ \text{масло} - 1\% \end{array} \right.$	1,1	80	5	САБ-100МН
$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaNQ} - 50\% \\ \text{ПАМ} - 7\% \\ \text{Al}_m - 30\% \\ \text{S} - 9\% \\ \text{Канифоль} - 2\% \end{array} \right.$	1	230	1,7	САБ-100-55
$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaNO}_3 - 52\% \\ \text{Mg} - 42\% \\ \text{Стеарин} - 2\% \\ \text{Канифоль} - 3\% \\ \text{Индустриальное}_ \text{масло} - 1\% \end{array} \right.$	2,5	88	6,5	САБ-250
$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ba}(\text{NO}_3)_2 - 46\% \\ \text{Mg} - 45\% \\ \text{СтеаратCa} - 4\% \\ \text{СКФ} - 32 - 5\% \end{array} \right.$	2,3	87	0,7	ОПС-122
$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaNO}_3 - 32\% \\ \text{Mg} - 64\% \\ \text{Графит} - 2\% \end{array} \right.$	4	87	3,2	ОПС-122
$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaNO}_3 - 46\% \\ \text{Mg} - 50\% \\ \text{Канифоль} - 4\% \end{array} \right.$	5	80	2	РОС «Свет»

Осветительные составы армии США

Название базы	Цвет пламени	Компоненты		
		Окислитель	Горючее	Добавки
Снаряжательная ВМ база г. Крейн	Белый	Ba(NO ₃) ₂ 21-43%	Mg 26-40% Al 4-6%	Na ₂ CrO ₄ NaF
Пикатинский арсенал	Жёлтый	NaNO ₃ 30-47%	Mg 50-58%	
Артиллерийская база г. White Oak	Жёлтый	NaClO ₄	Mg 52-58%	Ni тиокол

Синтетические белые пламена



Фотоосветительные составы и средства

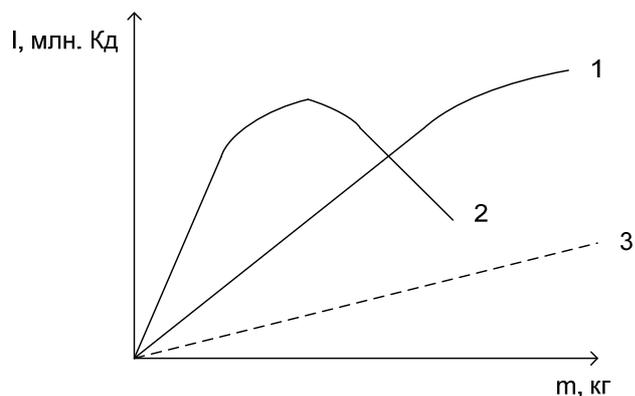
Фотоосветительные средства предназначены для фотографирования в ночное время, осуществляемого с помощью специальной высокоскоростной камеры, которой оборудован самолет. Изделие подсвечивает местность как вспышка фотоаппарата. Чем выше интенсивность вспышки и чем меньше её продолжительность, тем качественнее получается изображение.

Горючее	Окислитель	τ, с
Mg	KMnO ₄	0,03
Mg	KNO ₃	0,07
Mg	Ba(NO ₃) ₂	0,07
Mg	Sr(NO ₃) ₂	0,1
Mg	KClO ₄	0,01

Составы с магнием образуют при горении большое количество дыма, который поглощает значительную часть излучения, поэтому в качестве основного выбираем состав Ba(NO₃)₂ + AM.

Испытания состава Mg + KClO₄

Масса, кг	0,05	0,1	0,5	1	1,5
Время продолжительности вспышки, мс	28	40	74	80	170
Время достижения максимума, мс	11	13	17	26	30
Сила света, млн. Кд	8,5	15,3	22,5	45	60
Удельная светосумма, млн. Кд·с/г	170	150	115	80	50



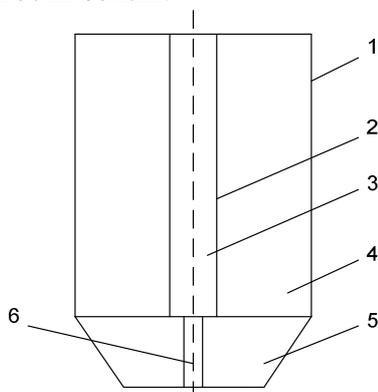
Зависимость характеристик от величины заряда

1 – монотонное возрастание силы света при увеличении заряда;

2 – изменение удельной светосуммы;

3 – время увеличения продолжительности свечения.

Для того чтобы обеспечить полноту сгорания аэрозвеси, целесообразно использовать специальный корпус, который бы позволял распылить фотосостав в форме блюдца, обращенного к поверхности земли.



1 – металлический корпус (толщина 5 мм);

2 – цилиндр с воспламенительно-разрывным зарядом;

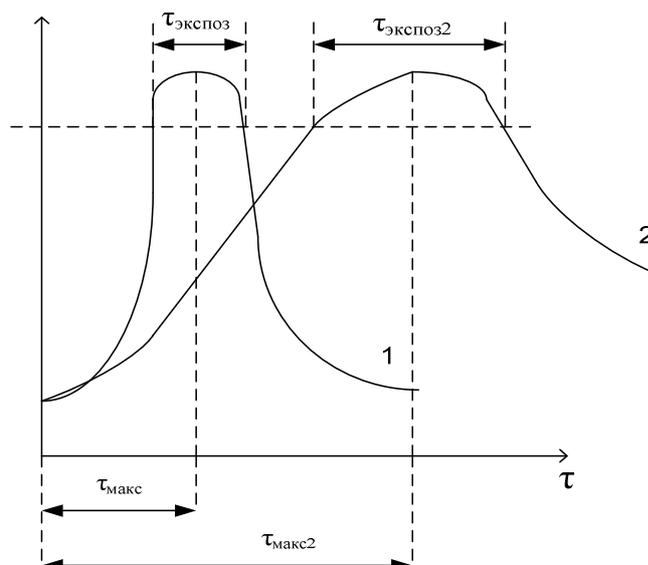
3 – воспламенительно-разрывной состав;

4 – фотосостав;

5 – головная часть авиабомбы;

6 – трубка.

В качестве основного состава применяют смесь нитрата бария с магнием или сплавом АМ, воспламенительно-разрывной заряд состоит из 90% ДРП и 10% АМ.



Испытание составов нитрат бария – магний и нитрат бария – АМ:
1 – нитрат бария – АМ; 2 – нитрат бария – магний.

Фотоавиабомба ФОТАБ-50-30 позволила фотографирование с высоты 5 км при скорости 600 км/ч. Основной заряд $Ba(NO_3)_2 + AM$ (50/50) – 15 кг, разрывной заряд ДРП + АМ (90/10) – 3 кг. Сила света изделия $I = 1$ млрд. Кд, $\tau_{max} = 8$ мс.

Фотоавиабомбы снаряжались набивкой, что было чрезвычайно опасно, поэтому было принято решение распылять высокодисперсные металлические порошки, обработанные маслом, прямо в воздухе (металлопылевые бомбы).

Название	Рецептура фотосостава	Характеристики
ФОТАБ-100-80	ОС $\left\{ \begin{array}{l} ПАМ - 98\% \\ \text{Веретенное _ масло} - 2\% \end{array} \right.$ РЗ $\left\{ \begin{array}{l} ДРП - 90\% \\ АМ - 10\% \end{array} \right.$	$I = 2,5 \cdot 10^9$ Кд $h = 10$ км
ФОТАБ-250-215	ОС $\left\{ \begin{array}{l} ПАМ - 98\% \\ \text{Веретенное _ масло} - 2\% \end{array} \right.$ 50 кг РЗ $\left\{ \begin{array}{l} ПАМ - 50\% \\ KClO_4 - 50\% \end{array} \right.$ 19 кг	$I = 5 \cdot 10^9$ Кд $h = 15$ км $\tau_{max} = 35$ мс $U = 1200$ км/ч
ФОТАБ-100-140	ОС $\left\{ \begin{array}{l} Al - IV - 98\% \\ \text{Коллоксилин} - 2\% \end{array} \right.$ 50 кг РЗ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Гексоген} \\ Al_m \end{array} \right.$	$I = 8,5 \cdot 10^9$ Кд $h = 15$ км $\tau_{max} = 14$ мс $U = 2500$ км/ч
М-120-А1 (США) Не металлопылевая	ОС $\left\{ \begin{array}{l} Ba(NO_3)_2 - 50\% \\ АМ - 50\% \end{array} \right.$ 50 кг РЗ $\left\{ \begin{array}{l} ТНТ - 90\% \\ Al - 10\% \end{array} \right.$ 2 кг	$I = 4,5 \cdot 10^9$ Кд $h = 15$ км $\tau_{max} = 5$ мс $U = U_{звук}$
М-120 (США) Металлопылевая	ОС $\left\{ \begin{array}{l} АМ \\ \text{Веретенное _ масло} \end{array} \right.$ 50 кг РЗ $\left\{ \begin{array}{l} ТНТ \\ Al \end{array} \right.$ 3 кг	$I = 2 \cdot 10^9$ Кд $\tau_{max} = 40$ мс

Составы цветных пламён

Цветные пламёна используются в целях сигнализации. Из числа окрашенных пламён практическое применение находят следующие цвета: красный, зелёный, жёлтый, белый.

Пороговая освещенность – это минимальная освещенность на сетчатке человеческого глаза, когда он воспринимает на тёмном или светлом фоне световую точку.

Цвет	Диапазон, нм	Доминирующая длина волны, нм	Пороговая освещенность, лк	
			Для ночного времени	Для дневного времени
Красный	600-700	630	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Зелёный	500-550	530	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Жёлтый	550-600	596	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Синий	400-500	470	$6 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

С учётом пороговой освещенности принципиально может быть рассчитана сила излучения заряда пиротехнического состава, его масса и габариты изделия. В отличие от осветительных пиротехнических составов, сигнальные могут иметь меньшее время горения. Для получения цветного пламени необходимо иметь в составе излучатель, возбуждённый атом металла, который будет излучать в необходимой области спектра.

Интенсивные спектральные линии

Элемент	T _{кип} , °C	Линия		
		λ, нм	E _{возб} , эВ	Интенсивность
Галлий	2070	403,3	3,1	1000
		417	3,1	2000
Индий	2075	410	3	2000
		451,1	3	5000
Таллий	1460	535	3,3	5000
Барий	1640	553,6	2,2	1000
Натрий	900	589	2,11	9000
		589,6	2,1	5000
Стронций	1383	689,2	1,8	3000
Литий	1370	670	1,84	3000
Калий	776	766	1,62	9000
		769	1,6	5000
Рубидий	680	780	1,6	9000
		794	1,6	5000
Цезий	688	852,2	1,4	5000
		894,4	1,4	2000
Cu ₂ Cl ₂	1490	488		7-8
		498		4-6
CaF		529		10
		583		7
		605		10
BaCl	1400	513		10
		524		10
SrOH		605		10
SrCl	1250	635		10
		636		4
		661		10
BaO	2600	535		7
		678		10

Таким образом, из числа атомов, пригодных для создания пламен синего цвета, в природе нет ни одного реального вещества.

На основании данных таблицы можно сделать вывод, что для создания окрашенных пламен возможно только использование атома натрия. Ввиду этого необходим поиск молекул-излучателей, находящихся в нестабильном состоянии.

$$\begin{cases} \text{Шеллак} - 15\% \\ \text{Ba}(\text{ClO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O} - 85\% \end{cases}$$

$U = 1 \text{ мм/с}$, P (насыщенность цвета пламени) = 80-85%, $\lambda_{\text{дом}} = 520 \text{ нм}$.

Для получения синего пламени может быть использован Cu_2Cl_2 , для зелёного цвета пламени – BaCl , а для красного – излучение SrCl . Для получения красного цвета пламени также можно применять излучение атомарного стронция ($\lambda_{\text{дом}} = 689 \text{ нм}$) совместно с излучением SrOH ($\lambda_{\text{дом}} = 605 \text{ нм}$).

Требования к сигнальным составам

1. Чистота цвета пламени в заданной области спектра должна быть не менее 70%.
2. Удельная световая энергия должна быть не ниже 1000 Кд·с/г.
3. Линейная скорость горения должна быть равна 3-6 мм/с.
4. Высокая химическая стойкость (составы должны иметь гарантийный срок хранения 20-25 лет).

Пути разработки окрашенных пламен

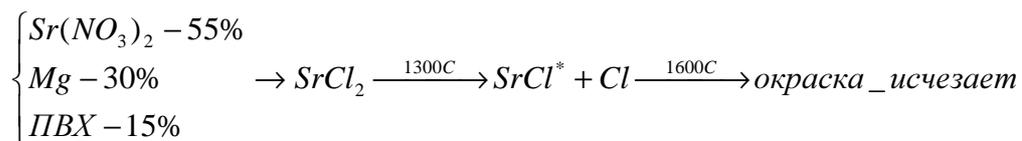
1. Цветопламенный окислитель: NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$.
2. Цветопламенное горючее: медь (порошок, пудра), сульфид меди (для синего цвета пламени).
3. Цветопламенные добавки: $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ – дает жёлтый цвет при добавлении к двухкомпонентной смеси магний – нитрат калия.
4. Наиболее используемая методика: включать в состав обычный кислородсодержащий окислитель, металлическое горючее и хлорсодержащую добавку.

Составы зелёного цвета пламени

$$\begin{cases} \text{Ba}(\text{NO}_3)_2 \\ \text{Mg} \\ \text{ГХЭ} / \text{ГХБ} / \text{ПВХ} \end{cases}$$

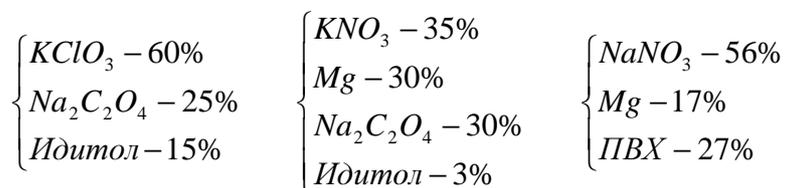
Хлорсодержащая добавка подвергается деструкции при горении, выделяет хлор, который взаимодействует с оксидом бария, либо с атомарным барием, образуется BaCl_2 , который при температуре 1400-1500°C диссоциирует на хлор и монохлорид бария. Однако при температуре свыше 2000°C диссоциации не происходит, а хлорид бария разлагается на барий и хлор. Таким образом, температурный диапазон горения состава должен быть на уровне 1500-1800°C.

Составы красного цвета пламени



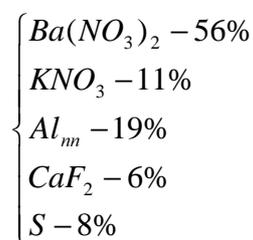
Составы жёлтого цвета пламени

В качестве окислителей используются $NaNO_3$, $NaClO_3$. В роли цветопламенных добавок используют $Na_2C_2O_4$, Na_3AlF_6 , NaF .



Белые пламена

Белые пламена могут быть получены смешением цветов.



Составы синего цвета пламени

Требования к органическому горючему:

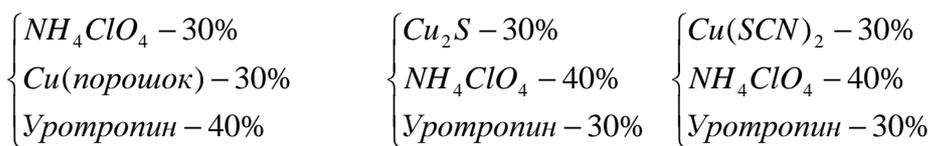
1. Максимальное содержание кислорода.
2. Минимальное содержание углерода.

Идитол: $C_{13}H_{12}O_2$

Шеллак: $C_{16}H_{24}O_5$

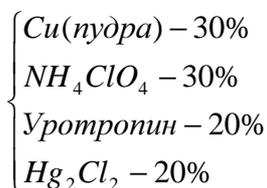
Лактоза: $C_{12}H_{24}O_{12}$

Присутствие в составе большого количества углерода даёт искры и жёлтый оттенок, поэтому единственное возможное для использования горючее – уротропин (имеет голубой оттенок). Излучение, обуславливающее окраску голубого цвета, создается за счет диссоциации $CuCl_2 \rightarrow CuCl^*$. Эта реакция начинается при температуре 800-900°C и нацело протекает при 1200°C, в результате окраска исчезает.

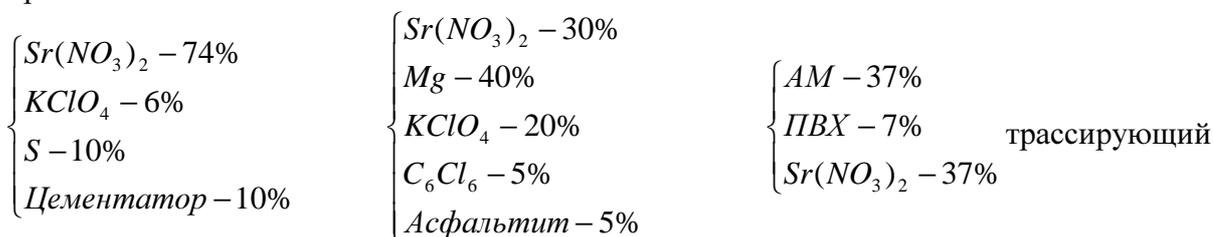


Составы армии США

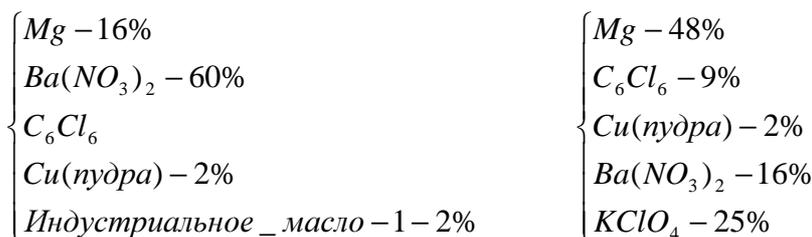
Синий:



Красный:

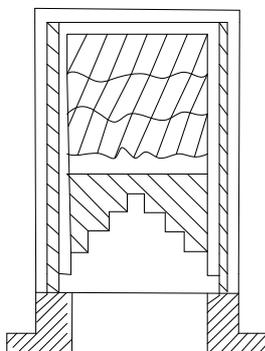


Зелёный:



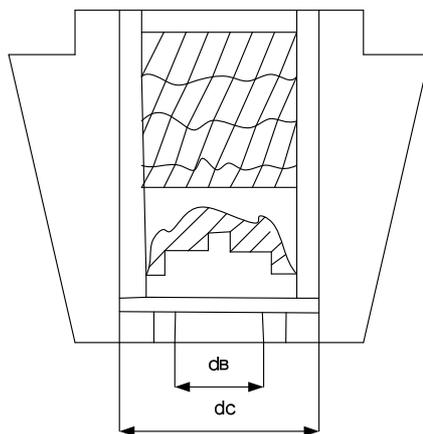
Трассирующие составы

Трассирующие составы используются для снаряжения трассеров. Трассирующие устройства предназначены для обозначения траектории полета различных изделий. Калибр: 5,45; 7,62; 12,7; 14,5 мм.

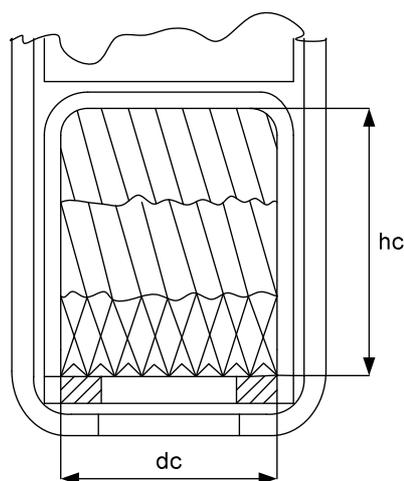


Артиллерийский трассер

Трассер находится в днище снаряда и крепится накладной (трассерной) гайкой. Состав прессуется в металлический стакан. Для уменьшения теплопередачи от состава к корпусу используется прокладка из асбестированной бумаги. Ступенчатая запрессовка увеличивает поверхность ВС. Прессуют при давлении 5-10000 ат.



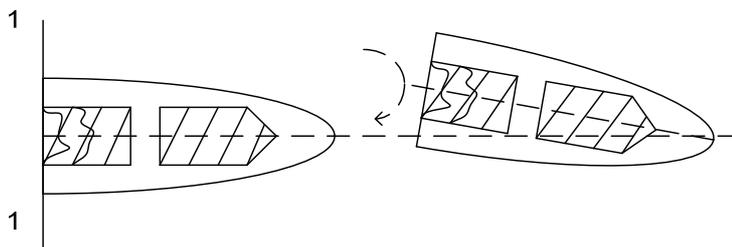
Этот трассер имеет свой толстостенный корпус и с натягом навинчивается снизу на снаряд.



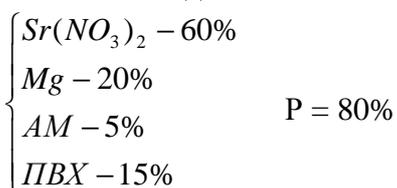
Трассер для стрелкового оружия

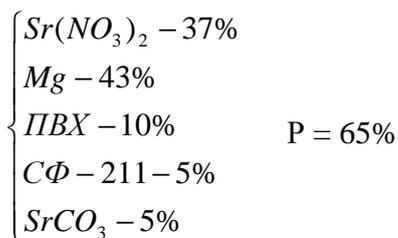
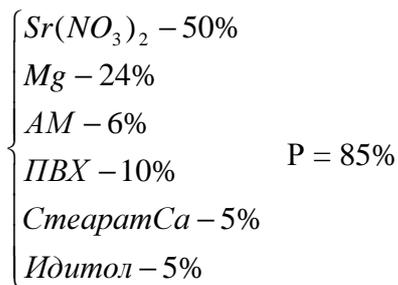
Состав запрессован в маленький стаканчик. Ребристая запрессовка обеспечивает большую поверхность ВС. Корпус пули загнут

Серьезным недостатком является то, что вследствие частичного выгорания пиротехнического состава трассирующая пуля меняет свою траекторию из-за смещения центра тяжести.



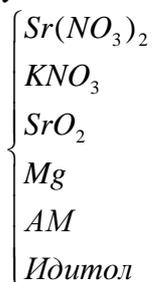
В сечении 1-1 в результате движения объекта происходит образование задонного вакуума. Чем выше скорость полета пули, тем выше значение задонного вакуума. В результате разрежения химические реакции будут протекать иначе. Введя коэффициент диафрагмирования, мы заставляем состав воспламеняться, а потом и гореть в условиях избыточного давления.





Составы для снаряжения пуль стрелкового оружия Проблемы обеспечения красного цвета пламени

Рассмотрим трассер для калибра 7,62 мм. Диаметр 5мм, высота 8 мм, масса ВС 100 мг, масса ПС 100 мг, масса ОС 500 мг. В качестве излучательного элемента используется SrOH, который дает линию 605 нм. Усилить излучение можно за счёт атомарного стронция, который может появиться только при стрельбе (полет со скоростью 1000 м/с) благодаря наличию задонного вакуума. Оксид стронция диссоциирует до стронция и кислорода при температуре 1000-1200°С в этих условиях, тогда как при нормальных условиях температура диссоциации составляет 2000°С.



SrO₂ – аналог перекиси бария – исключает возможность переуплотнения состава.

В калибре 7,62 используют состав, не содержащий нитрат калия. Необходимость изменения рецептуры была обусловлена тем, что при переходе на диаметр стаканчика 3,5 мм смесь не воспламенялась (критический диаметр).

Высотные трассеры

Высотные трассеры предназначены для наведения на цель реактивных снарядов. Основной используемый цвет – белый.



При серийной обработке составы, содержащие цирконий и перхлорат калия, чрезвычайно опасны.

Для снижения дымности трассирующих устройств очень часто вводят дополнительное горючее (алюминий или сплав АМ), получая составы пульсирующего горения.

$$\left\{ \begin{array}{l} Sr(NO_3)_2 - 70\% \\ AM - 30\% \\ \text{Синтетический каучук} - 5/100\% \end{array} \right. \quad \text{Частота пульсации } \nu = 2-5 \text{ Гц}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} NH_4ClO_4 - 65\% \\ AM - 35\% \\ \text{Каучук} - 5/100\% \end{array} \right. \quad \nu = 50-70 \text{ Гц}$$

Составы теплового излучения

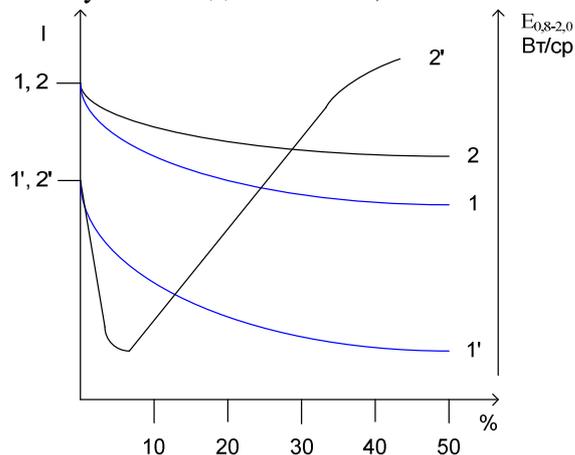
Если рассматривать суммарную энергию излучения нагретого абсолютно чёрного тела или пламени с температурой 3000К (энергия излучения при этом описывается законом Стефана-Больцмана или формулой Планка), можно установить, что на долю видимой области спектра (400 – 700 нм) приходится 10 – 30% суммарной энергии излучения. Незначительная часть энергии приходится на УФ диапазон, а большая часть – на невидимый тепловой диапазон (0,7 – 2 мкм). Запас этой энергии в пламени очень велик и чем больше длина волны, тем меньше рассеиваются тепловые лучи. Таким образом, при прочих равных условиях использование невидимого диапазона излучения оказывается предпочтительным для изготовления специальных трассеров. Также тепловые составы могут применяться в качестве пиротехнических имитаторов различных объектов.

Тепловое излучение поглощается двуокисью углерода и парами воды, присутствующими в атмосфере, поэтому пиротехники разработали составы, пламёна которых используются как источники теплового излучения в специальных диапазонах – *окнах прозрачности атмосферы*:

0,75 мкм – 2,4 мкм
3,3 мкм – 5,1 мкм
8,1 мкм – 13 мкм

ИК-диапазон определяется излучением молекул с учётом колебательной энергии, вращающей энергии и энергии осцилляции.

При разработке составов теплового излучения в качестве основной смеси была взята композиция Mg - KNO₃ (50/50), в нее добавляли различные органические вещества (идитол, нафталин) в количестве 5 – 50%, далее прессовали заряды и подвергали их испытаниям. В ходе испытаний измерялась сила света в видимой области спектра и время горения. Для эксперимента использовался специальный термоэлемент со светофильтром, регистрирующим энергию излучения в диапазоне 0,8 – 2 мкм.



Кривая 1 характеризует изменение силы света в зависимости от содержания идитола, кривая 2 – изменение силы света в зависимости от содержания нафталина. Кривые 1' и 2' характеризуют излучение относительно световой энергии. Из рисунка видно, что для идитола тепловая энергия снижается больше, чем видимая, для нафталина наблюдается иная картина. При введении 10 и менее процентов вещества энергия излучения в тепловой области снижается больше, чем при введении идитола, однако, впоследствии она начинает монотонно возрастать вплоть до 50% содержания нафталина в составе.

Для разработки составов с излучением в тепловой области спектра необходимо брать двухкомпонентную смесь и добавлять к ней органическое вещество – легкоиспаряющееся, но достаточно термостойкое (дифенил, нафталин, антрацен). В роли горючего может выступать магний или сплавы (ферросилиций, MgSi). В качестве окислителя применяют нитрат калия, но возможно использование нитратов цезия или рубидия, а также перхлората калия.

Рецептура	U, мм/с	λ_{\max}	Удельная энергосумма, Вт·с/ср·г	$L \cdot 10^{-3}$, Кд·с/г	$\frac{E_{1,8-6}}{E_{0,4-40}}$
$\left\{ \begin{array}{l} KNO_3 - 25\% \\ Mg - 38\% \\ \text{Дифенил} - 37\% \end{array} \right.$	6	2 мкм	770	2,6	87%
$\left\{ \begin{array}{l} NaNO_3 - 49\% \\ Mg - 51\% \end{array} \right.$	11	1,2 мкм	90	30	30%

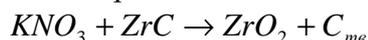
Тепловые трассеры, как правило, имеют рабочий диапазон спектра излучения от 0,8 до 2 мкм.

Ложные тепловые цели

При полете у самолетов нагреваются крылья, диффузоры, сопла. Максимум излучения лежит в диапазоне 3 – 6 мкм. Для БМП диапазон составляет 2,5 – 4 мкм. Для имитации подобного излучения подходит пироуглерод.

$$\left\{ \begin{array}{l} Mg - 45\% \\ \Phi - 4 - 35\% \\ \Phi - 3(\Phi K) - 20\% \end{array} \right. \quad \lambda_{\max} = 3 - 6 \text{ мкм}, E = 500 \text{ Вт/ср}$$

Для получения пироуглерода годятся карбиды ZrC и TiC:



Размер частиц пироуглерода находится в интервале 10 – 100 нм.

На основе карбидов были разработаны весьма эффективные составы ложных тепловых целей:

$$\left\{ \begin{array}{l} ZrC - 50\% \\ KNO_3 - 45\% \\ СКФ - 260 - 5\% \end{array} \right. \quad \lambda_{\max} = 2 - 6 \text{ мкм}, L = 1200 \text{ Вт/ср (изделие «ПИКС-23»)}$$

Воспламенительные составы

Воспламенительные составы применяются для инициирования основных составов. Для того чтобы специалист мог целенаправленно подойти к разработке воспламенительного состава, он обязан знать, от какого инициирующего импульса он сам приводится в действие.

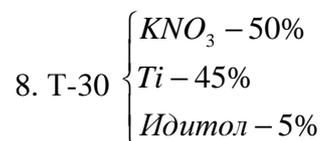
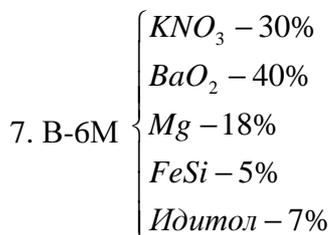
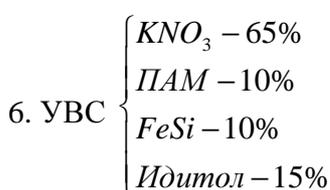
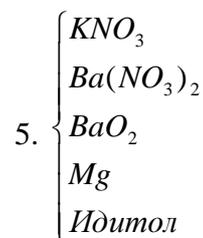
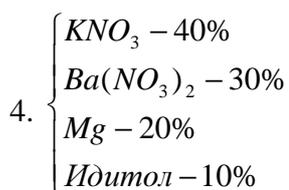
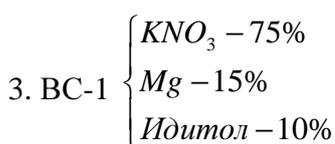
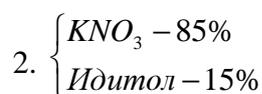
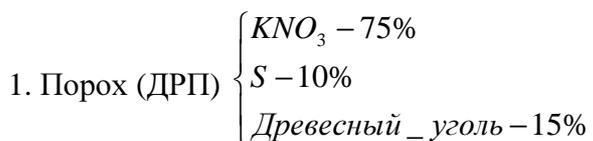
Классификация воспламенительных составов

1. Составы, инициируемые огневим импульсом. В качестве начального огневого импульса могут быть использованы: луч огня от навески пороха, стопин или огнепроводный шнур.
2. Составы, инициируемые механической энергией. Воспламенительный состав приводится в действие трением, ударом или наколом.
3. Составы, инициируемые тепловым импульсом. Например, составы для капсулей-воспламенителей.
4. Составы, воспламеняющиеся от воздействия лазера.

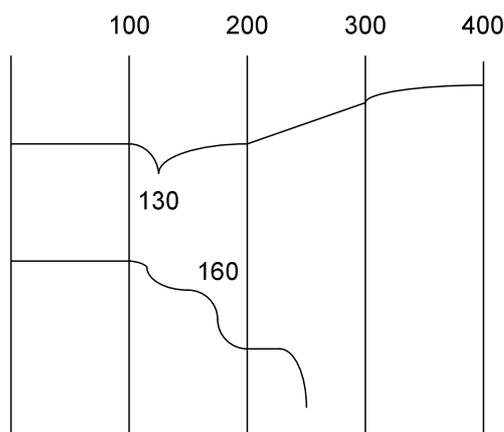
Разработка составов, инициируемых огневим импульсом

Требования

1. Высокая чувствительность к лучу огня.
2. Высокая воспламеняющая способность.
3. Высокая скорость горения (соизмеримая со скоростью горения основного состава).

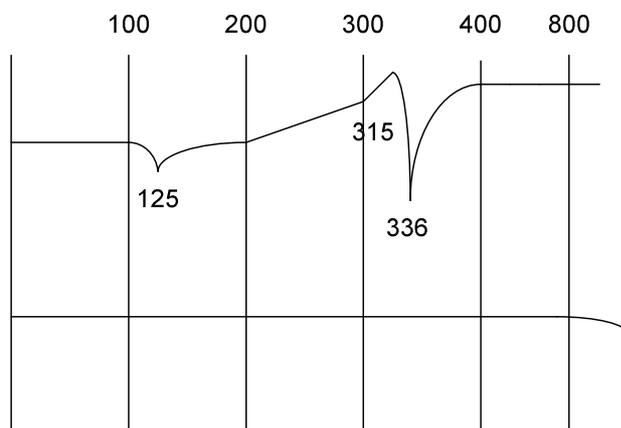


У всех перечисленных составов в качестве окислителя используется нитрат калия, а в качестве горючего – идитол. Чувствительность к лучу огня у двухкомпонентных смесей нитрата калия с органическими веществами определяется количеством оксигрупп, содержащихся в этих органических веществах.



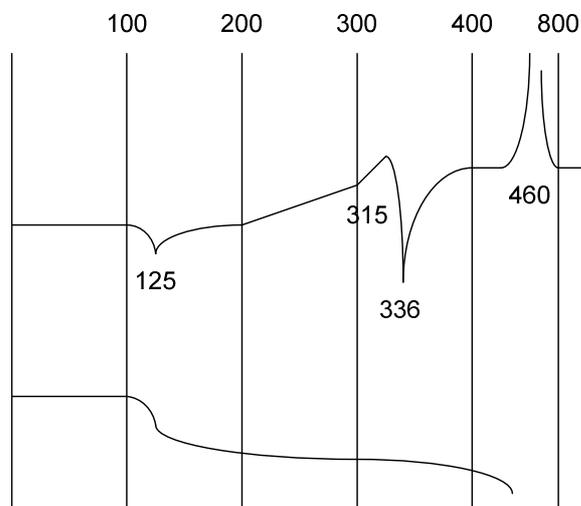
Идитол:

- 100-130°C – убыль массы, обусловленная присутствием воды;
- 130-135°C – температура плавления;
- 160°C – начало термического разложения;
- 230°C – температура интенсивного разложения;
- 280°C – разложение заканчивается



Нитрат калия:

- 125°C – полиморфное превращение ($\alpha \rightarrow \beta$);
- 315°C – появление первой капли расплава;
- 336°C – температура плавления;
- 700-800°C – незначительная убыль массы за счёт разложения.



Идитол - нитрат калия:
460°C – воспламенение.

Таким образом, из теории гетерогенных реакций следует, что благоприятным обстоятельством для их протекания является изменение фазового состояния одного из реагирующих компонентов. Можно считать, что процесс взаимодействия продуктов разложения идитола с выделением тепла может протекать не только при появлении газообразного окислителя, но непосредственно при взаимодействии с расплавом нитрата калия.

Таким образом, содержание в воспламенительном составе нитрата калия и органического вещества типа идитола (с содержанием оксигрупп) обеспечивает лёгкость воспламенения состава.

Другой составляющей любого воспламенительного состава является наличие других компонентов, которые, реагируя между собой, образуют конденсированные продукты сгорания, обладающие способностью прилипнуть к сгорающей поверхности или конденсироваться на ней и передавать тепло к поверхности основного заряда, постепенно увеличивая его температуру до температуры самовоспламенения.

Наличие в составе таких продуктов как $Ba(NO_3)_2$, BaO_2 , SrO_2 , $Sr(NO_3)_2$ обеспечивают выход следующих продуктов: BaO , SrO , которые имеют чётко выраженную температуру плавления (порядка $1400^\circ C$). При использовании в качестве дополнительного горючего кремния или ферросилиция среди продуктов горения воспламенительного состава будет присутствовать стекло. Таким образом, одна часть состава должна обеспечивать чувствительность к лучу огня, а вторая – воспламеняющую способность.

Состав	Действие	Процентное содержание в основной смеси
KNO_3 Идитол S Древесный уголь	Обеспечение чувствительности к лучу огня	10 – 50
$Ba(NO_3)_2$ Al Mg (AM)	Обеспечение высокой воспламенительной способности	50 - 90
Технологические добавки		

KNO_3 – 20%
 Идитол – 20%
 S – 5%
 $Ba(NO_3)_2$ – 20%
 Al – 20%
 Mg – 10%
 графит
 канифоль
 спирт

Терочные воспламенительные составы

Классическим примером терочных воспламенительных составов являются обыкновенные спички.

Состав тёрки:

$$\left\{ \begin{array}{l} KClO_3 - 51\% \\ \text{молотое _ стекло} - 15\% \\ \text{клей} - 11\% \\ ZnO - 7\% \\ Fe_3O_4 - 6\% \\ S - 5\% \\ MnO_2 - 4\% \\ K_2Cr_2O_7 - 1\% \end{array} \right.$$

Состав намазки:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{кр} - 37,2\% \\ Sb_2S_3 - 33,5\% \\ \text{клей} - 10\% \\ Fe_3O_4 - 7\% \\ \text{декстрин} - 7\% \\ MnO_2 - 3,5\% \\ \text{мел} - 2\% \\ \text{молотое _ стекло} - 0,8\% \end{array} \right.$$

Терочные ВС для дымовых составов:

Состав тёрки:

$$\left\{ \begin{array}{l} KClO_3 - 60\% \\ Sb_2S_3 - 30\% \\ \text{связующее} - 10\% \end{array} \right.$$

Состав намазки:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{кр} - 56\% \\ \text{стеклянный _ порошок} - 24\% \\ \text{идитол} - 20\% \end{array} \right.$$

Механизм воспламенения спичек

При трении о поверхность намазки имеет место разогрев головки спички до некоторой температуры, но не до температуры самовоспламенения (500°C). В месте контакта головки и намазки благодаря трению о поверхность в намазке происходит механокрекинг красного фосфора и его переход в белую форму. Белый фосфор имеет способность к самовоспламенению. Таким образом, слегка разогретая намазка на самой спичке воспламеняется от инициирующего импульса, который даёт загоревшийся белый фосфор. Оксид марганца и Fe_3O_4 в составе являются катализаторами полиморфного перехода красного фосфора в белый.

Составы воспламенительно-фрикционного действия

Запалы ударного действия

В отличие от терочных пиротехнических составов, воспламенительно-фрикционные используются для снаряжения запалов, имеющих высокую чувствительность к удару.

$$\left\{ \begin{array}{l} KClO_3 - 50\% \\ Sb_2S_3 - 25\% \\ PbO_2 - 25\% \end{array} \right.$$

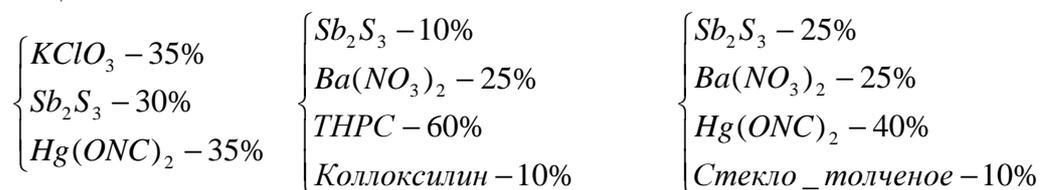
Хлорат калия – источник большого количества кислорода, легко разлагается при температуре 450°C , а в присутствии оксидов марганца, свинца, никеля или кобальта температура разложения снижается до 300°C .

PbO_2 при горении состава переходит в PbO , температура плавления которого составляет $840^\circ C$, а температура кипения $1400^\circ C$.

Трёхсернистая сурьма имеет в своем составе два горючих элемента: сурьму и серу. При горении состава этот компонент дает SO_3 и Sb_2O_3 .

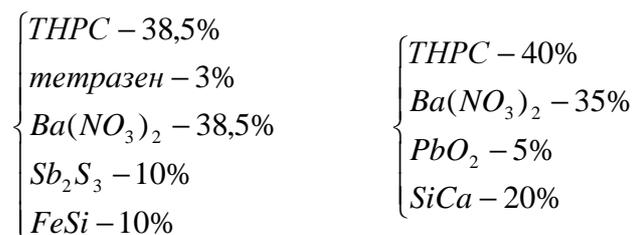
Таким образом, основными продуктами, обеспечивающими воспламенение пороха, являются газообразные оксиды свинца и сурьмы.

Для повышения чувствительности состава вводят инициирующие взрывчатые вещества.



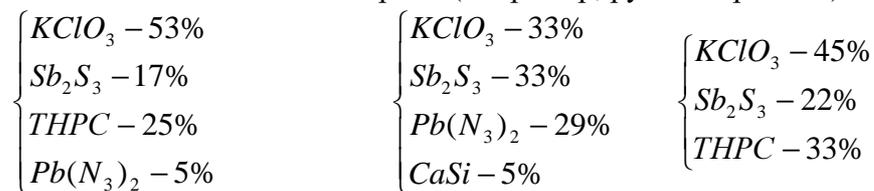
Из-за присутствия хлората калия возникает ржавчина, т.к. выделяющийся газообразный хлорид калия диссоциирует на калий и хлор, а хлор конденсируется на холодной поверхности металла и вызывает коррозию. Аналогичным образом конденсируется газообразная гремучая ртуть, амальгамируя внутреннюю поверхность ствола. Тонкий слой ртути нарушает точность стрельбы.

Нержавеющие составы

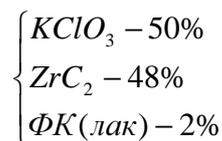


Запалы накольного действия

Запалы накольного действия представляют собой инициирующий элемент (капсюль), содержащий смесь, чувствительную к проникновению жала бойка. Подобные составы используют в тех случаях, когда необходимо воспламенить состав при небольшом количестве энергии (например, ручные гранаты).

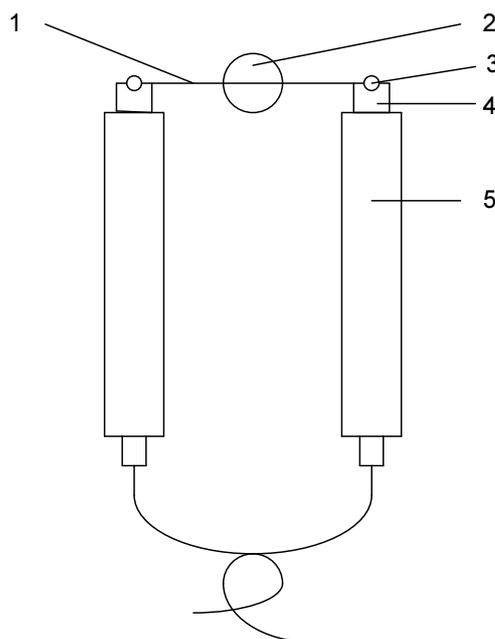


Оба состава не выдерживают длительного нагревания даже при температуре $200^\circ C$.



Этот состав выдерживает нагрев до $400^\circ C$ в течении 4 часов.

Воспламенительные составы для снаряжения электровоспламенителей



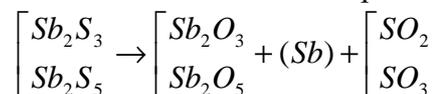
Воспламенитель мостикового типа:

- 1 – нить накаливания;
- 2 – ВС;
- 3 – место спайки;
- 4 – медная жила;
- 5 – одножильный провод.

Высота воспламенителя составляет 2 – 5 мм, длина мостика 1 – 3 мм, диаметр мостика от 10 мкм до 50 мкм.

Выбор горючего

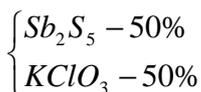
Металлические высокодисперсные компоненты использовать нельзя, т.к. в этом случае будет иметь место рассеивание тока и придется прикладывать большое напряжение. При использовании органического горючего получаются незначительные тепловые эффекты и низкие значения скорости горения, тогда как требуются скорости горения порядка 100 мм/с и выше. Таким образом, необходимо, чтобы выбранное соединение сочетало в себе свойства металлических порошков и органических горючих.



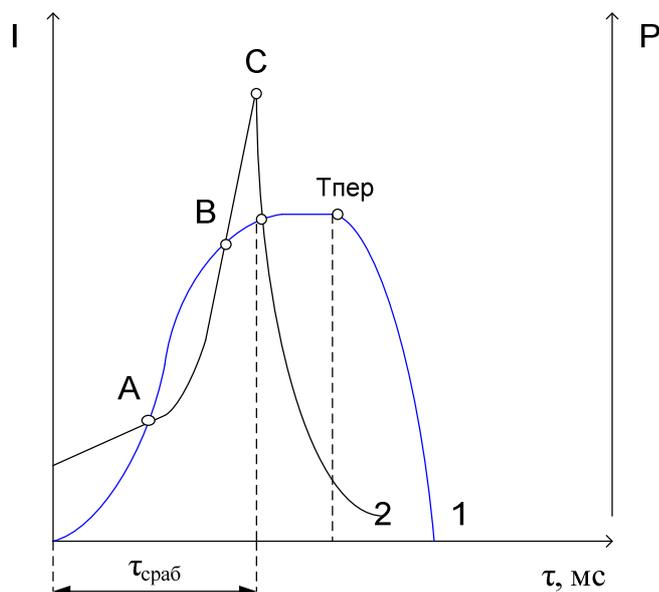
Выбор окислителя

Можно использовать кислородсодержащие окислители, которые разлагаются без плавления. В противном случае возникнет электропроводность через расплав окислителя. Также можно применять окислитель, который плавится с разложением, если композиция имеет температуру самовоспламенения меньшую, чем температура плавления окислителя.

Воспламенительные составы капельного типа

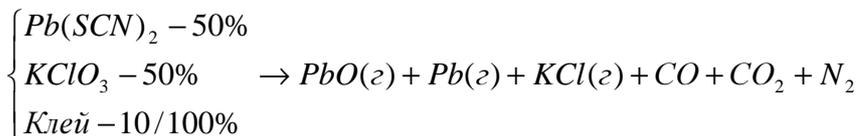


$T_{\text{самовоспл.}} = 350^\circ\text{C}$, $T_{\text{пл.}}(KClO_3) = 560^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{задержки}} = 0,4 \text{ с.}$

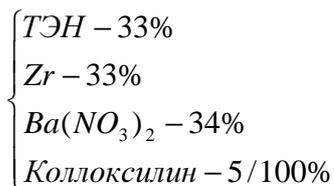


- 1 – кривая при чистом мостике;
 2 – кривая при выделении газообразных продуктов на мостике;
 А – начало газовой выделения;
 В – эффективная температура мостикового состава;
 С – максимум газовой выделения.

Для составов капельного типа обязательным является наличие жидкого связующего (лак нитроцеллюлозы, столярный клей, декстрин).



При разработке составов на основе бора следует помнить, что кристаллический бор проводит электрический ток, а аморфный – нет.



Погрешность во времени срабатывания может составлять 10-20 мс, это считается приемлемым.

Электровоспламенители со взрывающимися мостиками накаливания

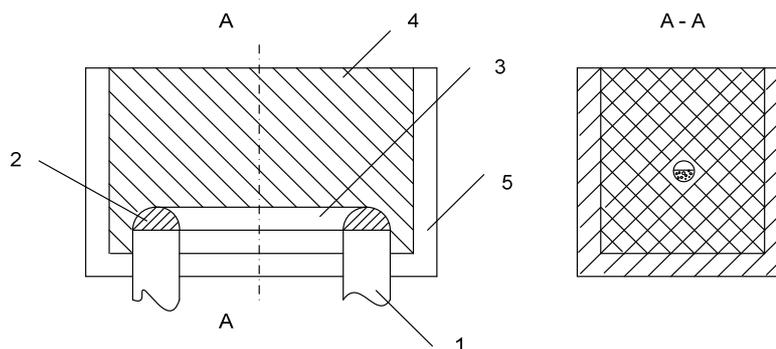
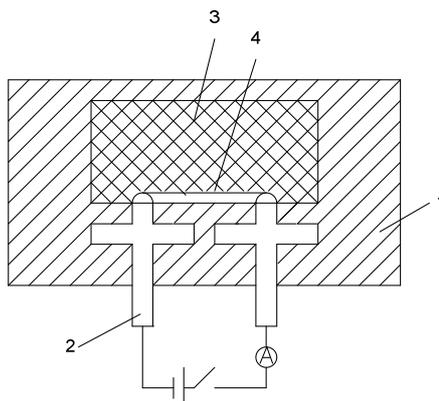


Схема электровоспламенителя со взрывающимся мостиком:

1 – электроды; 2 – спайка; 3 – мостик; 4 – ПС; 5 – корпус.

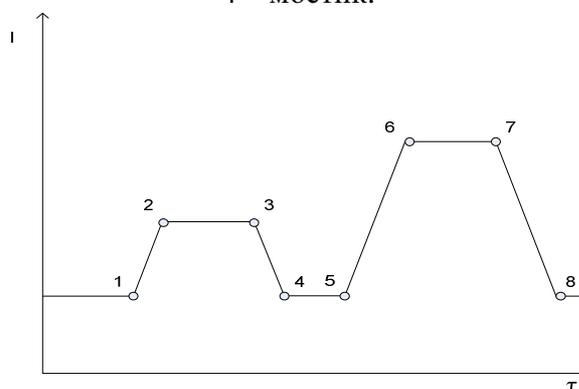


1 – корпус;

2 – электроды;

3 – запрессовка ПС;

4 – мостик.



Результаты испытаний:

1 – 2 – прохождение тока через твёрдый материал мостика накаливания;

2 – 3 – расплав мостика;

3 – 4 – испарение металла;

4 – 5 – пространство заполнено газообразным металлом, проводимости нет;

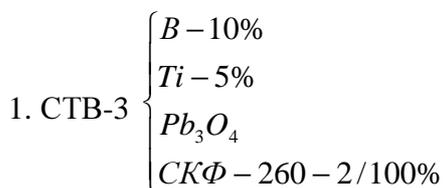
5 – 6 – газообразный металл начинает охлаждаться и конденсироваться на стенках, давление насыщенного пара снижается, увеличивается скорость пробега молекул, в результате соударений газ начинает ионизироваться;

6 – 7 – ток проводит только плазма, обладающая ничтожным сопротивлением, тепло не выделяется;

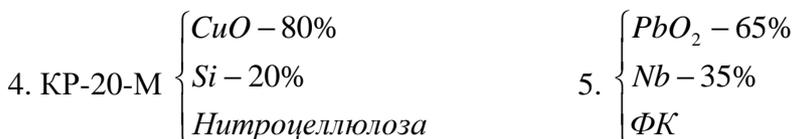
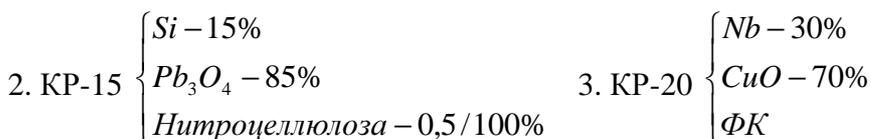
7 – 8 – протекают два процесса: уменьшение концентрации ионов и увеличение количества сконденсировавшихся частиц металла на поверхности, ранее занимаемой мостиком накаливания.

Для повышения надежности используют двухмостиковую конструкцию.

Предложенная конструкция воспламенителя позволила существенно расширить номенклатуру пиротехнических составов, используемых в качестве воспламенительных. Это позволило отказаться от смеси роданистого свинца (или роданистой меди) с хлоратом калия.

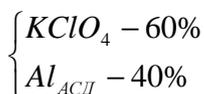


Состав выдерживает нагревание до 300°C в течении трёх часов, не чувствителен к механическим воздействиям.



Три последних состава впоследствии стали называть воспламенительными пироконтактными составами.

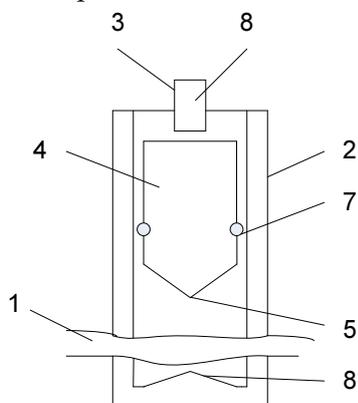
Конструкция воспламенителя позволила использовать в качестве воспламенительного состава следующую композицию:



Ударные пиротехнические составы

Подобные составы предназначены для снаряжения устройств, совершающих работу.

Электровоспламенители, включающие дополнительные заряды, собранные в едином корпусе, называются *пиропатронами*.



1 – трос; 2 – корпус; 3 – пиропатрон; 4 – ударник; 5 – жало; 6 – наковаленка; 7 – стопорное кольцо; 8 – ударный воспламенительный состав.

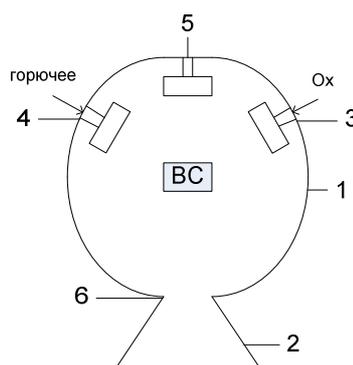
Сила состава:
$$F = \frac{P_{\max} \cdot V_0}{m_{\text{заряда}}} \left[\frac{\text{ат} \cdot \text{см}^3}{\text{г}} \right]$$

Состав	Сила состава F, ат·см ³ /г
Нитроглицериновый бездымный порох	8000
Чёрный порох	2000
Нитроцеллюлоза	7000
СТРТ	9000
Пикриновая кислота	6500
СЦ-1	1500

$$\text{СЦ-1} \begin{cases} P_3O_4 - 85\% \\ Zr - 15\% \\ \text{Нитроцеллюлоза} - 1/100\% \end{cases}$$

Воспламенение твёрдых и жидких ракетных топлив Особенности подбора рецептур ВС

Воспламенители для жидких ракетных топлив



1 – корпус двигателя;
2 – сопло;

3, 4 – форсунки горючего и окислителя;

5 – воспламенитель или специальная форсунка для ввода пускового реагента;

6 – участок возможного налипания частиц.

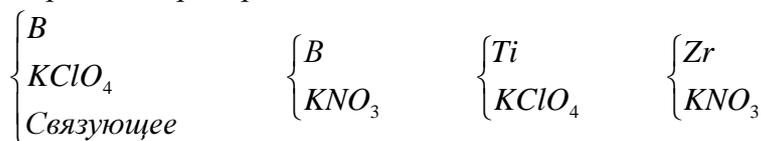
К числу жидких ракетных топлив относятся:

1. Криогенные топлива (жидкий кислород – жидкий водород, жидкий кислород – керосин, фтор – гидразин, фтор – аммиак). Характеризуются высоким импульсом тяги, но заполнение баков происходит непосредственно перед стартом. Эти топлива требуют воспламенения. Наиболее трудно воспламенить состав кислород – водород, т.к. температура его самовоспламенения составляет 650-750°С

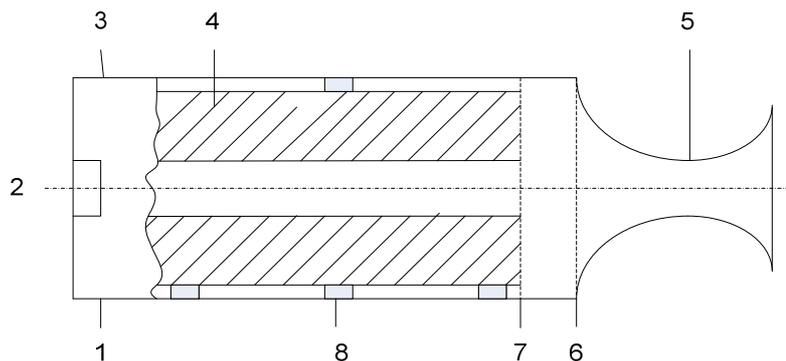
2. Самовоспламеняющиеся топлива (крепкая азотная кислота – диметилгидразин, перекись водорода – гидразин).

Необходимым условием для воспламенения жидких ракетных топлив является нагрев продуктами сгорания стенок камеры до температуры самовоспламенения исходных реагентов. Например, при использовании композиции жидкий кислород – жидкий водород стенки необходимо нагревать до 650°С. Продукты сгорания воспламенительного состава не должны налипать на стенки камеры и в особенности на сопло.

В качестве горючего используют такие металлы, которые не образуют налипающих на стенки оксидов и стеклообразных остатков: бор, титан, цирконий. При сгорании бора образуется газообразный оксид, а оксиды титана и циркония имеют очень высокие значения температуры плавления (более 2000°С). В качестве окислителей применяются нитраты и перхлораты.



Воспламенители для твёрдых ракетных топлив



Твердотопливный двигатель:

- 1 – корпус;
- 2 – электровоспламенитель;
- 3 – заряд ВС;
- 4 – заряд ТРТ;
- 5 – сопло;
- 6 – диафрагма;
- 7 – стабилизатор;
- 8 – вкладыш для фиксации заряда ТРТ.

Достоинства:

1. Готовность в любое время.
2. Небольшие габариты.
3. Небольшая масса.

Недостаток: в отличие от жидкостных ракетных двигателей, которые можно испытать, твердотопливные двигатели используются однократно, поэтому предварительной проверке не подлежат.

Воспламенители могут располагаться на донной стенке или на сопловой части. При расположении воспламенителя на донной части двигателя, как правило, наблюдается снос продуктов сгорания воспламенительного состава через сопло, и энергия воспламенительного состава используется не полностью. При расположении воспламенителя в сопловой части двигателя у донной стенки образуется застойная зона продуктов сгорания.

Продукты сгорания воспламенительного состава должны налипать на поверхность ТРТ.

Рецептуры ВС для ТРТ

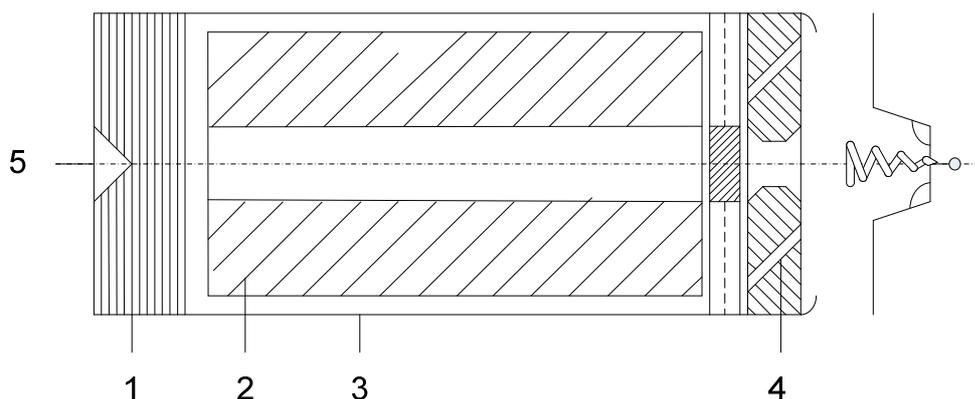
$$\left\{ \begin{array}{l} KClO_4 - 30\% \\ AM - 40\% \\ Э - 1 - 30\% \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} KClO_4 - 26 - 50\% \\ Ba(NO_3)_2 - 15 - 17\% \\ ZrNi(50/50) - 32 - 54\% \\ Нитроцеллюлоза - 3/100\% \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} KNO_3 - 30\% \\ Mg - 30\% \\ Ba(NO_3)_2 - 20\% \\ AM - 20\% \\ Нитроцеллюлоза \end{array} \right.$$

Проблемы при разработке ВС для ТРТ

В данном случае в первую очередь встает проблема конструкции воспламенителя. Исходя из сроков хранения (20 лет), воспламенители исполняются в герметичной упаковке. Для обеспечения нормального режима горения необходимо наличие свободного объема, для этого вводится коэффициент заряжения:

$$K_3 = \frac{V_{BC}}{V_{\text{воспламенителя}}} \approx 0,5 - 0,6$$

Состав, горящий при коэффициенте заряжения 0,9 – 0,95: $\left\{ \begin{array}{l} Mg \\ C_2F_4 \end{array} \right.$



- 1 – шашка сопровождения горения;
 2 – заряд ТРТ;
 3 – корпус из листового алюминия 0,3 – 0,5 мм;
 4 – дюзовые отверстия (3 шт.) для обеспечения четкой траектории за счёт вращения;
 5 – кумулятивная выемка.

Шашка сопровождения горения предназначена для особой конструкции двигателя на ТРТ, она позволяет создать носимые реактивные комплексы:

$$\left\{ \begin{array}{l} KNO_3 - 65\% \\ Ba(NO_3)_2 - 10\% \\ Mg - 12\% \\ Идитол - 13\% \end{array} \right.$$

Баллиститное топливо:

$$\left\{ \begin{array}{l} Нитроцеллюлоза - 56\% \\ Нитроглицерин - 28\% \\ Динитротолуол - 11\% \\ Воск - 4,5\% \end{array} \right.$$

При сгорании 1 г топлива выделяются следующие продукты:

- H_2 – 11200мл;
- H_2O (газ) – 1300 мл;
- CO_2 – 500 мл;
- CO – 800 мл;
- N_2 – 800 мл;
- прочие примеси – 600 мл.

Для достижения стабильной скорости горения требуются корпуса, выдерживающие давление до 70 ат. Только при этом условии соблюдается постоянство скорости горения топлива и постоянство тяги двигателя. Таким образом, корпус может быть выполнен только из металла. Установка шашки сопровождения горения позволяет снизить давление.

Воспламенительный состав РР-4:

$$\left\{ \begin{array}{l} BaO_2 - 48\% \\ Ba(NO_3)_2 - 30\% \\ Mg - 13\% \\ Идитол - 9\% \end{array} \right.$$

Зажигательные пиротехнические составы

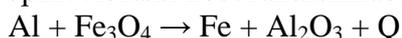
Классификация зажигательных средств

1. Индивидуальные вещества и смеси, воспламеняющиеся при контакте с горючим:
 - ClF_5 , ClF_3 , $HClO_4$, B_2F_6 , олеум + горючее (вата, бумага) → самовоспламенение;
 - нитрованные углеводороды (нитропарафины, нитраты сложных эфиров).
2. Вещества и смеси, воспламеняющиеся за счёт кислорода воздуха:
 - метан, этан, пропан, гептан, этилен, бензол, диметилгидразин;
 - бензин, газолин, керосин, нефть;
 - фосфор;
 - магний, щелочные металлы, сплав «электрон» (магний-алюминий-марганец);
 - некоторые виды урановых отходов.
3. Твёрдые горючие смеси (горят без доступа воздуха):
 - термиты;
 - смеси окислителя с металлом (зажигательные композиции);
 - зажигательные составы для пуль стрелкового оружия, мин, снарядов;
 - составы для сварки проводов, рельс и резки металла.
4. Загущенные огнесмеси:
 - жидкое горючее, загущенное органическим веществом или полимером (бензин + полиизобутилен);
 - загущенное горючее, окислитель и металл (напалм, супернапалм);
 - металлизированные огнесмеси частного применения (дымозажигательные огнесмеси, огнесмеси, плавающие на поверхности воды).

Требования к составам

1. Максимальная температура горения.
2. Максимальная теплотворная способность.

Термиты – составы, подразумевающие сочетание металла и оксида металла, в результате взаимодействия которых металл восстанавливается и остается на поверхности.



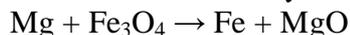
Характеристики состава: $T_{\max} = 2700^{\circ}\text{C}$, $q = 2,1$ ккал/г, $T_{\text{пл}}(\text{Fe}) = 1300^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{кип}}(\text{Fe}) = 2700^{\circ}\text{C}$.

Недостатки: трудно воспламенить, отсутствует окружающее пламя.

На основе алюминия применяются следующие термитные составы:

- Al + MnO₂;
- Al + Cr₂O₃;
- Al + CrO₃;
- Al + Cr₂O₇.

На основе магния эффективным оказался следующий состав:



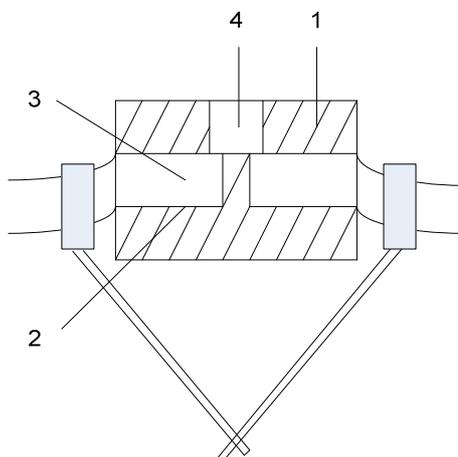
Термомуфельная шашка диаметром 10 – 15 мм сваривает провода диаметром до 5 мм.

Эффективнее использовать состав следующего содержания:



Для сварки многожильных проводов используется шашка АС-40:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Al} - 30\% \\ \text{Mg} - 10\% \\ \text{Fe}_3\text{O}_4 - 40\% \\ \text{Ba}(\text{NO}_3)_2 - 20\% \end{array} \right.$$



1 – термитный состав;

2 – металлический стакан, предотвращающий раскручивание проводов;

3 – стальные провода;

4 – отверстие для вставки прутка, который будет плавиться вместе с горением шашки.

Серийные зажигательные составы

Авиабомба ЗАБ-2,5 (2,5 кг зажигательного состава):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaNO}_3 - 51\% \\ \text{Al-IV} - 15\% \\ \text{Al-II} - 15\% \\ \text{AM-IV} - 8\% \\ \text{S} - 9\% \\ \text{Канифоль} - 2\% \\ \text{Индустриальное _масло} - 2/100\% \end{array} \right.$$

Авиабомба ЗАБ – Э1 (вес 1 кг)

Сплав «Электрон»:

$$\begin{cases} Mg - 90 - 94\% \\ Al - 0.5 - 1\% \\ Zn, Mn - 1.5 - 5\% \end{cases}$$

Самовоспламеняется при контакте с воздухом при температуре 600 - 650°C.

Загущенные металлизированные огнесмеси

Загустители бензина: нафтеновая и пальмитиновая кислоты + спирт + р-р NaOH. Сначала происходит реакция омыления, а затем структурирование. С целью снижения потерь бензина в результате растекания, впитывания грунтом необходимо загущение. В результате загущения плотность и температура горения увеличиваются.

Варианты составов:

1. Состав для огнеметов: 1,5 – 3% загустителя (полиизобутилена).
2. Загущенный ОС: 3 – 5% загустителя. $T = 1200^\circ\text{C}$
3. Непотушаемый загущенный бензин: ОС + $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{NaNO}_3/\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. $T = 1500^\circ\text{C}$.

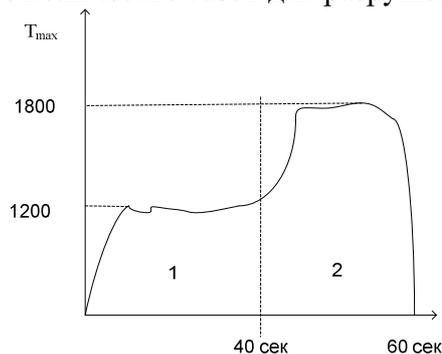
$$4. \begin{cases} \text{ОС} \\ \text{Окислитель} - 10 - 15\% \\ \text{Горючее} (Mg) - 10 - 15\% \end{cases}$$

$$5. \begin{cases} \text{ОС} - 40 - 50\% \\ Mg(\text{стружка}) / Al(I - II) - 10\% \\ \text{Fe}_3\text{O}_4 - 10\% \\ \text{Ba}(\text{NO}_3)_2 / \text{NaClO}_4 - 10\% \\ \text{Специальные}_\text{ - добавки} \end{cases}$$

В последней композиции в качестве основного состава используют гептил, бензин, керосин или толуол, загущенный полиметакрилатом. В роли специальной добавки в США, например, выступает белый фосфор, который имеет свойство поражать нервные окончания и поэтому наносит значительно большее поражение, чем напалм без добавки. Соединения напалма с канцерогенными веществами или урановыми отходами называют *супернапалмами*.

Стадийность горения металлизированных огнесмесей

После начала горения на поверхности состава образуется плотный графитовый каркас, который препятствует дальнейшему горению. Добавка молибдена прорывает углеродную оболочку, но его использование очень дорого. Добавка идитола в количестве 5% вырабатывает достаточное количество газов для разрушения оболочки.



1 – стадия выгорания паров бензина; 2 – вспыхивание ПС.

Огнесмеси частного применения

1. Дымозажигательные огнесмеси.

C_2Cl_6/C_6Cl_6 – черный дым;

Красный фосфор – белый/желтый дым.

2. Плавающие огнесмеси.

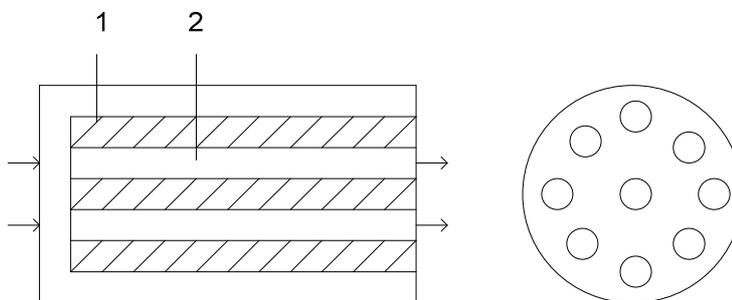
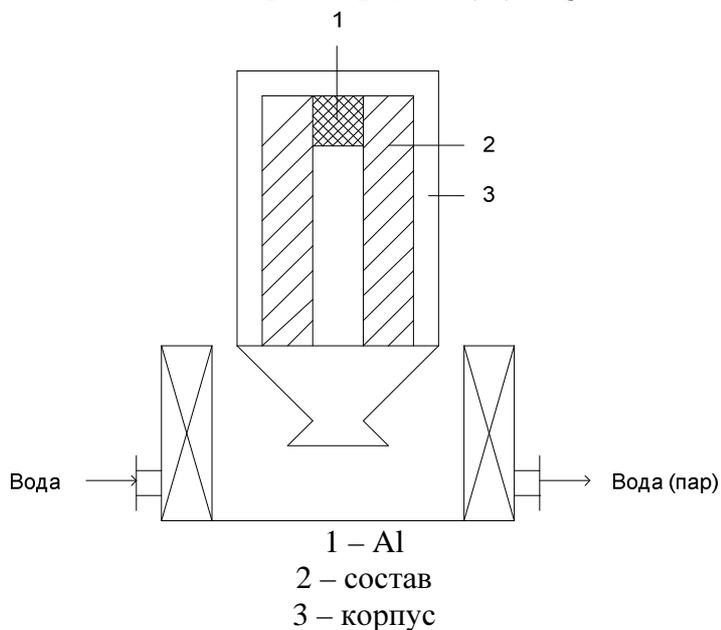
Высокодисперсный алюминий АСД – 5%

Na_2CO_3 – 5%

Гидрореагирующие топлива для торпедного оружия

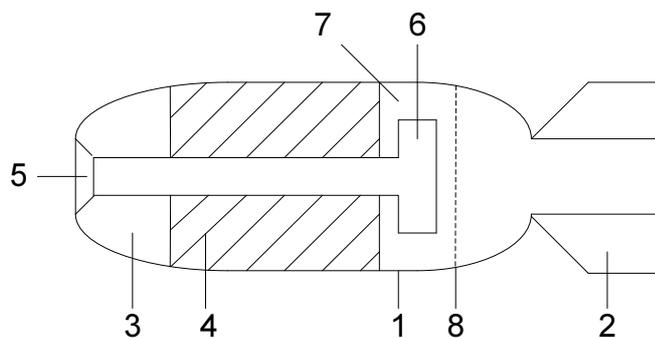
Разработка изделий, в том числе, для вооружения ВМФ, требует поиска новых источников энергии для приведения в действие торпед. Движущей силой процесса является вращение винта. Сначала для этих целей использовались аккумуляторные батареи. Затем начали использовать газотурбинный двигатель на основе керосина и пероксида водорода, которые образовывали газы, вращающие турбину. Затем были синтезированы образцы монотоплива.

$Al \rightarrow Al (ж) - \text{распыляется в виде капель}$



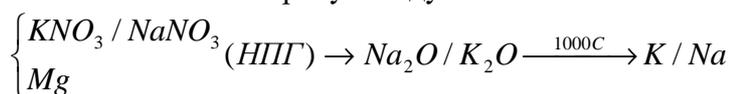
1 – заряд состава;
2 – трубы.





- 1 – корпус;
 2 – рули стабилизации;
 3 – боевая часть;
 4 – заряд ТРТ;
 5 – диффузор;
 6 – форсунки для распыления воды;
 7 – камера сгорания;
 8 – решетка – стабилизатор горения.

Необходимо создать заряд ТРТ с максимальным содержанием горючего, а в качестве окислителя использовать забортную воду.

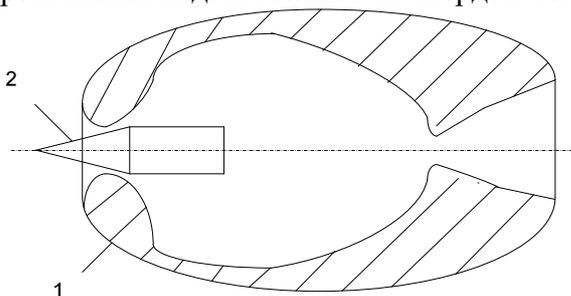


Методом гидростатического прессования были снаряжены 500-мм заряды.

Прямоточно-воздушные реактивные двигатели.

Варианты конструкций и твёрдые пиротехнические топлива для их снаряжения.

ПВРД используются в качестве второй ступени ракет. В роли окислителя выступает атмосферный кислород, что делает этот вид двигателей более экономичным по сравнению с обычными реактивными двигателями на твёрдом топливе.



- 1 – корпус;
 2 – обтекатель.

Набегающий поток, попадая в диффузор, подвергается следующим изменениям: плотность возрастает, скорость и температура увеличиваются. На высоте 10 км и скорости потока 1М давление набегающего потока возрастает в десятки раз, плотность воздуха увеличивается в сотни раз, а температура – в 10-25 раз. Сжатый нагретый воздух попадает в камеру сгорания, в этот момент начинается горение топлива. Происходит дополнительный нагрев, что приводит к тому, что температура набегающего потока возрастает до 1500°С, реагируют недоокисленные продукты, повышая, в свою очередь, температуру до 3000°С. За счёт продуктов сгорания многократно увеличивается объем, и давление достигает 25 – 30 ат.

Требования к твёрдому пиротехническому топливу

1. Максимальная теплотворная способность.
2. По возможности только газообразные продукты горения.
3. Возможность изготовления заряда диаметром 0,5 м и высотой 1-2 м.
4. Гарантийный срок хранения 30 лет.

Разработка топлив

В качестве горючего используется исключительно магний. В качестве окислителя применяют нитрат натрия, т.к. подходящий по всем остальным параметрам перхлорат аммония имеет очень низкую химическую стойкость. Из органического горючего (основного) удобнее всего брать нафталин.

$$\begin{cases} \text{NaNO}_3 - 20\% \\ \text{Mg} - 10\% \\ \text{Нафталин} - 70\% \end{cases}$$

Принцип построения рецептуры: берется минимальное количество термовозгоночной смеси (нитрат натрия - магний), которое необходимо для полного испарения нафталина и нагрева его до 1500°C.

Недостатки:

- отсутствие тяги на стопе – не может стартовать без ускорителя;
- узкий высотный диапазон;
- невозможность создания крупных ракет.

Ракетный прямоточно-воздушный реактивный двигатель

Преимущества:

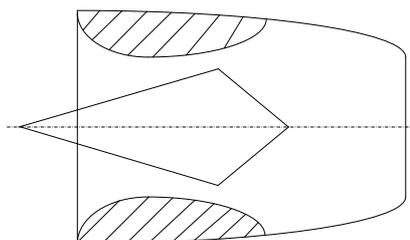
- менее подвержен изменению угловой атаки;
- за счёт газогенератора может стартовать со стопы;

$$\begin{cases} \text{Al(АСД)} \\ \text{Тиокол} \\ \text{NaClO}_4 \end{cases} \begin{cases} \text{Mg} \\ \text{NaNO}_3 \\ \text{Тиокол} \end{cases} \begin{cases} \text{ЭД - 4 / ЭД - 5} \\ \text{NH}_4\text{ClO}_4 \\ \text{Al} \\ \text{отвердитель} \end{cases}$$

Эпоксидный компаунд ЭК 1 - 4:

$$\begin{cases} \text{эпоксидная смола} - 50\% \\ \text{каучук} - 50\% \end{cases} \quad Q = 15 \text{ ккал/г}$$

Гиперзвуковой двигатель



Скорость двигателя 10 – 20 М, скорость горения топлива - сверхзвуковая. В качестве жидкого топлива используют жидкий водород, который впрыскивают непосредственно в камеру.

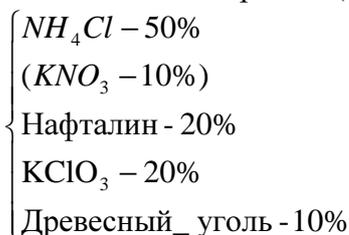
Составы аэрозолей

Любой аэрозоль включает в себя две составляющие:

1. Дисперсионная среда.
2. Дисперсная фаза – твердое вещество, размер частиц которого соизмерим с длиной волны видимого света.

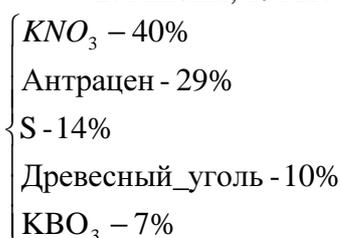
Первые дымовые составы относятся к периоду первой мировой войны.

1. Смесь Ершова (Россия, 1910 г.):



В качестве окислителя используется хлорат калия, в качестве горючего – уголь и нафталин. Дымообразователем в данном случае является хлорид аммония, который при влажности около 1% имеет температуру возгонки 600°C. В сухом виде хлорид аммония разлагается при 400°C.

2. Англия, 1912г.:

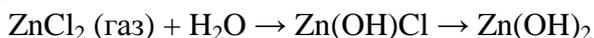


Окислитель – нитрат натрия, горючее – уголь и сера. В роли дымообразователя выступает антрацен, устойчивый вплоть до температуры 1500°C. В зависимости от содержания в антрацене различных масел, он может быть от белого до жёлтого цвета, соответствующим получается и дым.

3. Франция, 1910 г.:

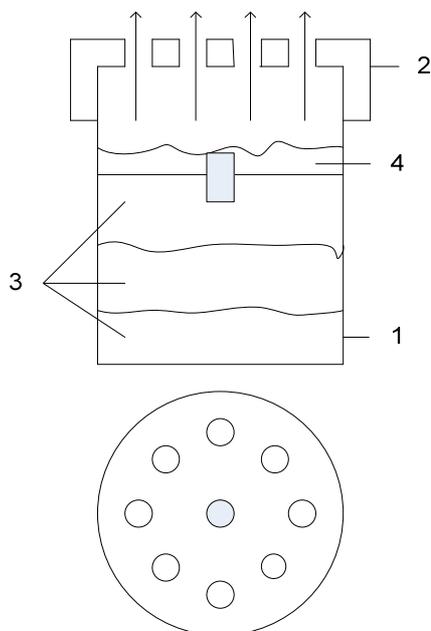


Металлохлоридный дым – дымообразователем является продукт горения. В роли окислителя выступает четыреххлористый углерод. Хлорат натрия является активатором горения, он первым вступает в реакцию с цинком, и температура достигает 1000°C. При этой температуре происходит диссоциация CCl_4 , образуется хлорид цинка, который при температуре 1500°C превращается в газ. Далее полученный газ вступает в реакцию гидролиза с водой воздуха.



Особенности конструктивного исполнения

Если дымовой состав запрессовать в оболочку и воспламенить, то он сгорит практически без дыма, быстро и с копотью.

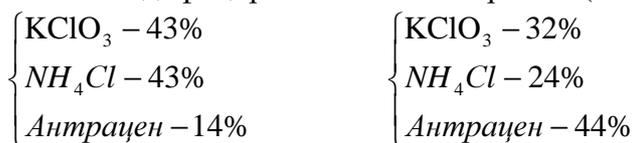


- 1 – металлический корпус;
 2 – металлическая крышка с отверстиями;
 3 – дымовой состав;
 4 – ВС: УВС + ДС (50/50).

Относительная плотность составляет 0,6 – 0,7, уплотнение осуществляется набивкой или шнекованием. Несильное уплотнение позволяет дымообразователю легче выходить из глубины. Крышка предохраняет состав от попадания кислорода воздуха, который может окислить дымообразователь, а также создает избыточное давление для равномерного выхода дымообразователя.

Нашатырно-антраценовые дымы

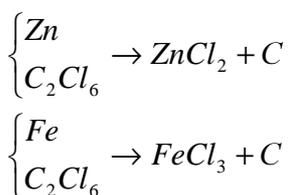
Модифицированная смесь Ершова (1938 – 1939 гг.):

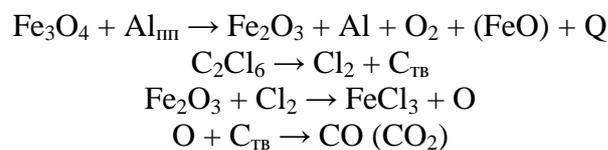
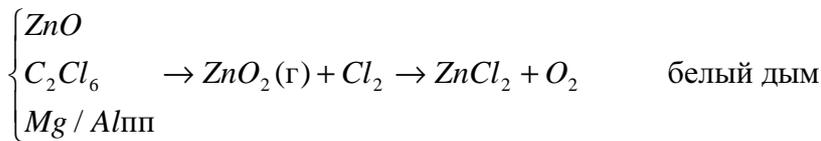
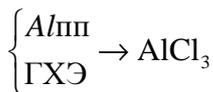
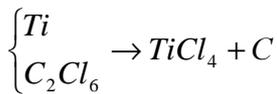


Хлорид аммония, находясь под крышкой, не дает проникнуть туда кислороду воздуха, препятствует нормальному горению и окислению антрацена.

Металлохлоридные дымы

Дымы	Маскирующая способность, м ² /г
Нашатырно-антраценовые	250
Металлохлоридные	400 - 500
Фосфор	920

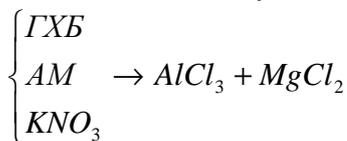




Составы дымовой защиты от поражения

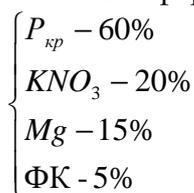
Развитие техники требует создания абсолютно новых средств дымовой защиты танков, БМП, способных на быструю установку дымовой завесы.

Изделие «Туча» (дальность до 500 м, время срабатывания 10 сек):

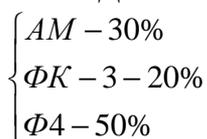


Состав уплотняют методом глухого прессования, в одной из двух 70-мм шашек проделывают канал.

Фосфорный дым:



Дымовой состав для защиты от поражения с воздуха:



Цветные дымы

Цветные дымы используются для сигнализации и целеуказания. Для обозначения траектории полёта служат дымовые авиационные патроны.

Термовозгоночные дымовые составы включают в себя термическую смесь и краситель. У термической смеси должна быть невысокая температура горения, но достаточный запас тепла для возгонки красителя. Также термическая смесь не должна ухудшать окраску дыма. Многолетняя практика показала, что наилучшей композицией

является смесь хлората калия и лактозы. Количество термической смеси в дымовом составе определяется экспериментально, но обычно содержание ее варьируется от 40 до 60% от общей массы состава. Краситель не должен быть растворим в воде.

Составы красного дыма:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{КСЮ}_3 - 20\% \\ \text{Лактоза} - 20\% \\ \text{Паранитроанилиновый} _ \text{красный} - 60\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{КСЮ}_3 - 29\% \\ \text{Лактоза} - 32\% \\ \text{Родамин} \end{array} \right.$
--	---

Составы жёлтого дыма:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{КСЮ}_3 - 33\% \\ \text{Лактоза} - 24\% \\ \text{Аурамин} - 34\% \\ \text{Хризоидин} - 9\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{КСЮ}_3 - 30\% \\ \text{Лактоза} - 20\% \\ \text{Аурамин} - 40\% \\ \text{Хризоидин} - 10\% \end{array} \right.$
--	---

Хризоидин добавляется в составы жёлтого дыма для устранения зеленого оттенка.

Составы синего дыма:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Индиго} - 40\% \\ \text{КСЮ}_3 - 25\% \\ \text{Лактоза} - 35\% \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Метиленовый} _ \text{синий} - 40\% \\ \text{КСЮ}_3 - 25\% \\ \text{Лактоза} - 35\% \end{array} \right.$
---	--

Составы зеленого дыма.

Т.к. красителей зелёного цвета в природе не существует, дым зеленого цвета получают синтетическим образом путем смешивания синего и желтого красителей с близкими температурами возгонки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Индиго} - 26\% \\ \text{Аурамин} - 15\% \\ \text{КСЮ}_3 - 33\% \\ \text{Лактоза} - 26\% \end{array} \right.$$

Составы чёрного дыма.

Составы чёрного дыма получают путем разрушения веществ, богатых углеродом, который выделяется при возгонке в виде сажи или пироуглерода:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ГХЭ} - 60\% \\ \text{Mg} - 20\% \\ \text{Нафталин} - 20\% \end{array} \right.$$

Составы активного воздействия на погоду (Льдообразующие аэрозоли)

Считается, что град образуется в облаке, получившем большое вертикальное развитие за счёт сильных восходящих потоков воздуха. На этих потоках значительное время поддерживаются крупные капли воды в переохлажденном состоянии (до -20°C). В самой верхней части облака, находящейся на высоте 8 – 10 км, в результате сильного переохлаждения до температуры -40°C происходит спонтанная кристаллизация переохлажденных капель, и образуются ледяные частицы. При падении этих частиц вниз, в зону оставшихся переохлажденных крупных водяных капель, вследствие разности упругости насыщенного водяного пара над водой и над льдом при отрицательной температуре происходит рост льда и намерзание капель на ледяных частицах. В результате этого образуются градины такого веса, который восходящий поток уже не в состоянии поддерживать.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{KClO}_3 - 43\% \\ \text{NH}_4\text{Cl} - 43\% \\ \text{Антрацен} - 14\% \end{array} \right.$$

Для борьбы с градом необходимо постараться внести в переохлажденное облако многочисленные маленькие центры кристаллизации (50-500 нм). Количество центров кристаллизации должно составлять $10^{12} - 10^{16}$ частиц с грамма состава. В результате на искусственно введенных центрах кристаллизуется избыточная влага, и образуются очень маленькие кристаллы. Облако необходимо засеивать частицами, кристаллическая форма которых идентична кристаллической форме льда.

В качестве активных реагентов более всего подходят йодиды свинца и серебра – эти вещества имеют схожую со льдом кристаллическую структуру, а кроме того, сравнительно легко возгоняются. У йодида серебра, например, количество активных центров составляет 10^{16} частиц на грамм.

Сначала для введения состава использовалось прямое распыление с самолетов смеси йодида серебра с ацетоном – это было неудобно. Некоторое время применялся взрывной метод распыления состава (ТНТ + AgI), однако, это оказалось малоэффективно, т.к. от взрыва большое количество частиц разваливалось, и желаемый эффект достигнут не был. Тогда было решено прессовать шашки с термовозгоночным составом и йодидом серебра. Для введения состава непосредственно в облако была спроектирована ракета «Алазань», конструкция которой предусматривала наличие взрывчатого вещества (ТНРС), которое должно было дробить изделие на мелкие части.

Состав:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NH}_4\text{ClO}_4 + \text{Идитол} - 50\% \\ \text{AgI} - 50\% \end{array} \right.$$

Затем была придумана ракета «Облако», конструкционное преимущество которой заключалось в наличии парашюта.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{KNO}_3 - 18,8\% \\ \text{BaO}_2 - 19,5\% \\ \text{Mg} - 4,2\% \\ \text{AgI} - 52,3\% \\ \text{Al}_{\text{мн}} - 5,3\% \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NH}_4\text{ClO}_4 - 45 - 47\% \\ \text{ФФС} - 12 - 14\% \\ \text{AgI} - 40 - 42\% \\ \text{Графит} - 1 - 2\% \end{array} \right.$$

Содержание йодида в составе необходимо было уменьшить из-за его дороговизны, поэтому в композиции начали дополнительно вводить йодиды аммония и калия.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NH}_4\text{ClO}_4 - 52\% \\ \text{ФФС} - 18\% \\ \text{NH}_4\text{I} - 30\% \\ \text{AgI} - 2/100\% \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NH}_4\text{ClO}_4 - 49 - 55\% \\ \text{ФФС} - 11 - 13\% \\ \text{AgI} - 1.5 - 2.5\% \\ \text{KI} - 28 - 32\% \\ \text{Графит} \end{array} \right.$$

Кроме подобия кристаллического подобия со льдом, активный реагент должен был образовывать водородные связи с молекулами воды. К таким веществам относятся: флороглуцин (1,3,5-триоксибензолтрифенол), метальдегид и ацетилацетонат меди. Указанные реагенты возгоняются при температуре 300 – 400°C.

Пиротехнические составы как источники газообразных продуктов

Образование газа является одним из видов пиротехнических эффектов при горении ПС. Этот эффект используется для получения чистых газов: кислорода, водорода и азота. Источники кислорода требуются, например, для обеспечения жизнедеятельности экипажей подводных лодок и космических станций. Азот используется в подушках безопасности. Пиротехнические источники газов выгодно отличаются от всех прочих систем по той причине, что получаемые газы чисты по химическому составу, источники газов транспортабельны и могут долго храниться, а помимо прочего они очень компактны.

Источники кислорода

Требования к составам:

1. Минимальное содержание горючего (не более 10% по массе).
2. Индивидуальные источники должны выделять не менее 150 л/кг кислорода.
3. Источники для космических аппаратов – более 350 л/кг.

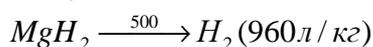
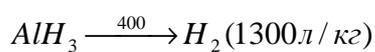
Используемые вещества:

- Хлораты и перхлораты щелочных металлов : перхлорат лития (380 л/кг), хлорат лития (335 л/кг);
- Хлораты и перхлораты щелочноземельных металлов: перхлорат магния (370 л/кг), перхлорат кальция (350 л/кг), перхлорат никеля (335 л/кг).
- Перекиси и надперекиси щелочных металлов: перекись натрия, надперекись натрия – эти вещества в присутствии 10% металла воспламеняются при попадании воды.

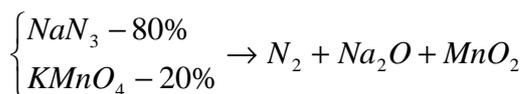
Год	Страна	Состав	$V_{уд}$, л/кг	$T_{термост}$	T_{max}
1946	США	$\left\{ \begin{array}{l} NaClO_3 - 80\% \\ Fe - 10\% \\ BaO_2 - 4\% \\ \text{молотое_стекло} - 6\% \end{array} \right.$	240	250	800
1948	СССР	$\left\{ \begin{array}{l} NaO_2 - 60\% \\ H_3BO_3 - 28\% \\ Al_{III} - 2\% \\ SiO_2 - 10\% \end{array} \right.$	180	60	450
1963	СССР	$\left\{ \begin{array}{l} KO_2 - 40\% \\ NaO_2 - 15\% \\ KHSO_4 - 40\% \\ Al_{III} - 3\% \\ \text{Асбест} - 2\% \end{array} \right.$	120	120	450
1973	США	$\left\{ \begin{array}{l} NaClO_3 - 80 - 95\% \\ Na_2O_2 - 5 - 20\% \end{array} \right.$	300	130	550
1976	США	$\left\{ \begin{array}{l} NaClO_3 - 85 - 93\% \\ CoO \cdot Co_3O_4 - 1\% \\ \text{Стекло} - 1 - 3\% \end{array} \right.$			

1976	СССР	$\left\{ \begin{array}{l} LiClO_4 - 77 - 79\% \\ Mg - 2 - 4\% \\ NaO_2 - 33 - 35\% \\ Асбест - 3\% \end{array} \right.$	350	120	600
1978	СССР	$\left\{ \begin{array}{l} LiClO_4 - 37 - 45\% \\ Mg(ClO_4)_2 - 21 - 29\% \\ NaO_2 - 33 - 35\% \\ Асбест - 1 - 2\% \end{array} \right.$	360	120	600
1979	СССР	$\left\{ \begin{array}{l} Mg(ClO_4)_2 \\ Na_2O_2 - 30 - 50\% \end{array} \right.$	360-370	130	500

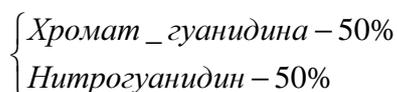
Источники водорода



Источники азота



Температура горения смеси 600°C, удельный объем азота – 460 л/кг.



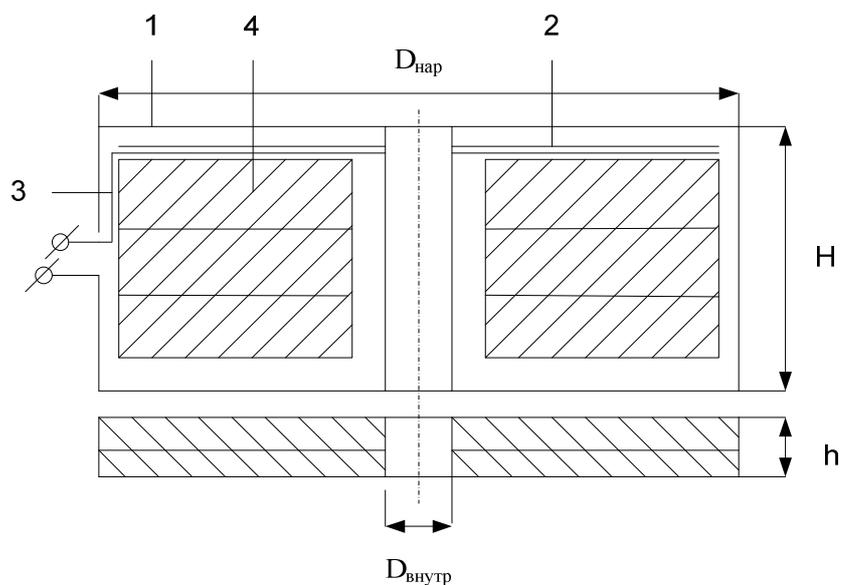
Температура горения смеси 400-450°C, удельный объем азота – 530 л/кг.

Составы – источники тепла

Требования к составам:

1. Надёжность и легкость воспламенения.
2. Максимальная чувствительность к лучу огня.
3. Минимальный уровень газовыделения.
4. Продукты сгорания должны сохранять первоначальную форму запрессовки.
5. Продукты сгорания не должны проводить ток.
6. Состав в уплотненном виде должен иметь достаточную механическую прочность.
7. Высокая теплотворная способность и максимальная скорость горения.

Эти составы применяются для снаряжения разогревных источников тока (РИТ). В разогревных источниках тока электролит находится в твёрдом состоянии и расположен между двумя электродами. Активировать источник можно плавлением. Таким образом, подобные источники тока можно хранить десятилетиями.



Элемент разогревного источника тока:

- 1 – корпус из магния (анод);
- 2 – диэлектрическая пластина из слюды;
- 3 – катод (кальций);
- 4 – твёрдый электролит (CaCl_2 , MgCl_2);
- 5 – малогазовый состав;
- 6 – подложка.

$D_{\text{нар}} = 25-300$ мм;

$D_{\text{внутр}} = 5-35$ мм;

$H = 3-10$ мм

$h = 0,5-1$ мм.

Хромат	Zr, %	U, мм/с	Q, кал/г	$V_{\text{уд}}, \text{см}^3/\text{г}$
CaCrO_4	47	150	680	5
SrCrO_4	40	130	580	7
BaCrO_4	35	110	460	7