

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

Кафедра высокоэнергетических процессов

Л. Н. Свиридов, А. А. Осыка, Д. В. Королев

**РАСЧЕТ РЕЦЕПТУР
ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ
Методические указания лабораторным работам**

Санкт-Петербург

2007

УДК 662.5

Л. Н. Свиридов, А. А. Осыка, Королев Д. В. Расчет рецептур пиротехнических составов: Методические указания к лабораторным работам.— СПб.: ГОУ ВПО СПбГТИ(ТУ), 2007. — 31 с.

В методических указаниях приведены краткие сведения о пиротехнических составах, описаны различные способы расчета содержания компонентов. Изложение материала пояснено примерами расчетов.

Методические указания предназначены для студентов IV—VI курсов кафедры высокоэнергетических процессов. Могут быть полезны студентам, преподавателям и научным сотрудникам, специализирующимся в области разработки пиротехнических составов.

Табл. 7.

Рецензент: Д. Б. Демьяненко, нач. отдела 72 ФГУП СКТБ
«Технолог»

Утверждены на заседании учебно-методической комиссии факультета наукоемких технологий __.__.2007.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Краткие сведения о пиротехнических составах.....	4
2 Принципы построения пиротехнических составов	7
3 Расчет рецептур пиротехнических составов	13
3.1 Расчет через кислородные эквиваленты	13
3.2 Расчет через молекулярные массы	17
3.3 Расчет рецептур через систему уравнений	22
3.4 Рецептуры с лаковой составляющей	25
3.5 Обеспеченность пиротехнической смеси кислородом	26
Приложение 1 (Справочное). Сродство элементов к кислороду в зависимости от температуры и теплоты образования окислов	29
Приложение 2 (Справочное). Кислородные эквиваленты окислителей.....	30
Приложение 3 (Справочное). Кислородные эквиваленты неорганических соединений	32
Приложение 4 (Справочное). Кислородные эквиваленты органических горючих.....	34

1 КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВАХ

Пиротехнические составы – механические смеси мелкодисперсных порошков, способных к горению. Минимальное количество компонентов в пиротехническом составе - два: окислитель и горючее.

$\left. \begin{array}{l} \text{окислитель} \\ \text{горючее} \end{array} \right\} \text{ пиротехнический состав}$

Чаще всего рецептура строиться следующим образом:

$\left. \begin{array}{l} \text{окислитель} \\ \text{горючее} \\ \text{лак} \\ \text{добавки} \end{array} \right\} \text{ пиротехнический состав}$

Окислитель – вещество, участвующее в реакции горения. Является источником кислорода (фтора, хлора).

С точки зрения пиротехники интересно количество *Общего* и *Активного* кислорода, содержащееся в кислородсодержащих окислителях.

Общий кислород – количество кислорода в соответствии с формулой вещества

$$O_K = \frac{M_{O_2}}{M_v}, \quad (1.1)$$

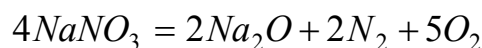
где O_K - общий кислород, M_{O_2} - молекулярная масса кислорода в веществе, M_v - молекулярная масса вещества.

Активный – кислород, который непосредственно участвует в реакции окисления

$$A_K = \frac{k \cdot M_{O_2}}{b \cdot M_v}, \quad (1.2)$$

где A_K - активный кислород, $k \cdot M_{O_2}$ - молекулярная масса «чистого» кислорода с учетом коэффициентов уравнения, $b \cdot M_v$ - молекулярная масса исходного вещества, с учетом коэффициентов уравнения.

Пример расчета общего и активного кислорода для $NaNO_3$:



$$O_K = \frac{M_{O_2}}{M_{\text{в}}} = \frac{3 \cdot 16}{85} \cdot 100\% = 56\%$$

$$A_K = \frac{5 \cdot 32}{4 \cdot 85} \cdot 100\% = 47\%.$$

Горючие - вещество, участвующее в реакции горения. Вступает в реакцию с кислородом (фтором, хлором).

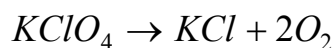
Кислородные эквиваленты

Кислородный (фторный, хлорный) эквивалент окислителя – количество грамм окислителя, при разложении которого выделится 1 грамм кислорода (фтора, хлора)

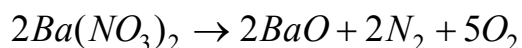
Кислородный (фторный, хлорный) эквивалент горючего – количество горючего, в граммах, которое вступит в реакцию с 1 граммом кислорода

Кислородные (фторные, хлорные) эквиваленты используются для расчета содержания компонентов в рецептурах

Примеры расчета кислородных эквивалентов (КЭ).



$$KЭ = \frac{M_{KClO_4}}{2 \cdot M_{O_2}} = \frac{139}{2 \cdot 32} = 2.17$$



$$KЭ = \frac{2 \cdot M_{Ba(NO_3)_2}}{5 \cdot M_{O_2}} = \frac{2 \cdot 261.4}{5 \cdot 32} = 3.27.$$

Кислородный баланс

Кислородный (фторный, хлорный) баланс – количество кислорода (фтора, хлора) в граммах, которое выделится (или дополнительно необходимо для полного окисления горючего) при сгорании 100 грамм пиротехнической смеси.

Кислородный баланс рассчитывается:

$$KB = \frac{\%ок}{KЭ_{ок}} - \frac{\%гор}{KЭ_{гор}}, \quad (1.3)$$

где $\%ок$, $\%гор$ – процентное содержание горючего и окислителя в рецептуре, $KЭ_{ок}$, $KЭ_{гор}$ – кислородные эквиваленты окислителя и горючего соответственно.

Пиротехнические составы, кроме кислородного баланса, характеризуются еще *обеспеченностью кислородом*. Обеспеченность ПС кислородом вычисляется по соотношению:

$$\alpha = \frac{m_{ок}}{m_{гор}}, \quad (1.4)$$

где $m_{ок}$ – количество активного кислорода, содержащееся в окислителях в 100 г пиротехнического состава; $m_{гор}$ – количество кислорода, необходимого для окисления горючих, содержащихся в 100 г пиротехнического состава.

2 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ

Пиротехнические составы являются механическими смесями, содержащими, по крайней мере, два компонента: горючее и окислитель; последний является источником кислорода или хлора (фтора), необходимых для окисления горючего. В том случае, когда горючим является соединение, то окисляются или продукты разложения горючего, или одновременно и горючее, и продукты его разложения.

Соотношение между окислителем и горючим определяется реакцией окисления горючего и продуктов его разложения кислородом или хлором (фтором) окислителя, и, следовательно, может быть определено стехиометрически. Одно и то же вещество в различных пиротехнических составах может выполнять различные функции. Сера, например, в одних составах ($KClO_4$ и S) является горючим, в других (термит, Al и S) – окислителем; окислы железа и окислы некоторых металлов в безгазовых и пламенных составах являются только окислителями, в металлохлоридных составах являются и горючими, и окислителями:



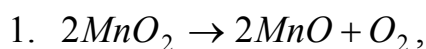
При составлении сложных реакций горения пользуются следующим приемом:

- сначала пишут реакцию разложения окислителя, сопровождаемую выделением свободного или «активного» кислорода;
- затем пишут реакцию окисления горючего за счет «активного» кислорода;
- уравнивают коэффициенты при «активном» кислороде в обоих уравнениях;
- полученные после этого уравнения складывают и производят необходимые сокращения.

При составлении реакций разложения окислителей следует иметь в виду:

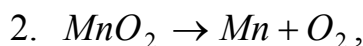
- в хлоратах и перхлоратах (кроме перхлората аммония) весь кислород является «активным»;
- количество «активного» кислорода в окислах, перекисях и нитратах металлов зависит от кислородного баланса состава (от соотношения между окислителем и горючим), от сродства горючего к кислороду и, так как сродство элементов к кислороду зависит от температуры, то и от температуры горения составов.

Двуокись марганца в смеси с высококалорийными металлами разлагается по двум уравнениям:



содержание активного кислорода в MnO_2 :

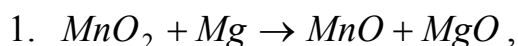
$$A_{MnO_2} = \frac{32}{2 \cdot 86.93} \cdot 100\% = 18.5\%,$$



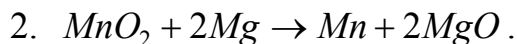
содержание активного кислорода в MnO_2 :

$$A_{MnO_2} = \frac{32}{86.93} \cdot 100\% = 37.0\%.$$

Для смеси ($MnO_2 - Mg$) соотношение между MnO_2 и Mg в первом случае должно соответствовать уравнению:

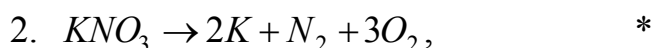
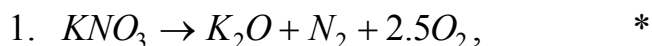


во втором случае:

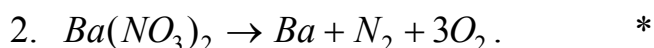
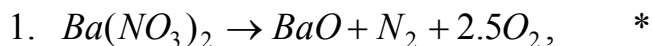


Разложение нитратов металлов протекает по двум направлениям:

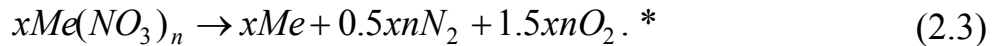
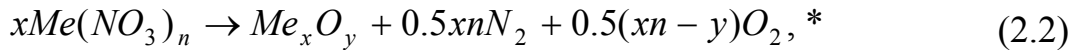
для нитрата калия



для нитрата бария



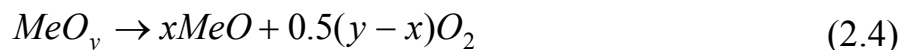
В общем виде:



В реакциях, помеченных *, при разложении нитратов образуются такие окислы азота, которые при горении ПС являются промежуточными продуктами.

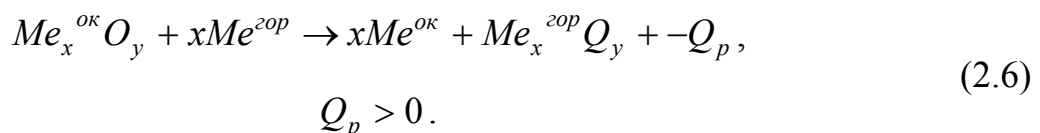
Образуется ли в процессе горения состава при разложении нитрата окисел или металл, зависит от температуры горения состава, от кислородного баланса состава и от сродства к кислороду металла, нитрата и горючего, с которым смешан нитрат.

При высокой температуре горения состава, при любом кислородном балансе состава металл образуется в горячей зоне пламени за счет диссоциации окисла (MeO_y), образовавшегося при разложении нитрата.



Первая реакция протекает легче второй, так как при высокой температуре многоатомные окислы одного и того же элемента менее устойчивы, чем одноатомные. Металл, попадая затем в холодную зону пламени, окисляется до устойчивого к кислороду окисла.

Металл, как конечный продукт горения состава, может образоваться в том случае, если металл окислителя устойчив к кислороду и если сродство металла окислителя к кислороду меньше сродства горючего, т.е. если горючим является металл.



О сродстве элементов к кислороду с термодинамической точки зрения можно судить или по теплотам образования окислов (термодинамический тепловой эффект реакции окисления), отнесенных к единице кислорода, или по величине максимальной работы реакции

окисления элементов кислородом. О сродстве металлов к кислороду судят так же по равновесной упругости кислорода при диссоциации окислов. (Упругость диссоциации – давление газа, при котором устанавливается состояние химического равновесия).

Максимальная работа реакции окисления металлов может быть вычислена, например, по уравнению:

$$A_t = H_{298} - T \cdot S_{298} - \int_{298}^T dT - \int_{298}^T \frac{CdT}{T}, \quad (2.7)$$

где A_t – максимальная работа при температуре T в К и постоянном давлении; H_{298} – термодинамический тепловой эффект реакции при постоянном давлении и температуре 25°C; C – алгебраическая сумма теплоемкостей, участвующих в реакции веществ; S_{298} – энтропия реакции при постоянном давлении и температуре 25°C.

В таблице 1 приведены термодинамические тепловые эффекты реакций окисления (Q), максимальная работу реакций окисления (A_t) и упругость диссоциации окислов элементов.

Таблица 1 – Термодинамические величины реакций окисления

Оксид	Q , ккал/г–атом O_2 , при 25°C	A_i , ккал/г–атом O_2 , при 25°C	Равновесное давление P_o , атм., при 600 К
<i>CoO</i>	151.9	145.3	-
<i>MgO</i>	146.0	137.0	-
<i>SrO</i>	140.1	-	-
<i>BaO</i>	133.4	-	-
<i>Al₂O₃</i>	133.0	114.7	-
<i>ZrO₂</i>	129.1	-	-
<i>SiO₂</i>	102.7	91.5	-
<i>Na₂O</i>	99.4	90.0	-
<i>MnO</i>	92.0	87.7	$6.6 \cdot 10^{-61}$
<i>Cr₂O₃</i>	89.9	-	-
<i>K₂O</i>	86.8	-	-
<i>ZnO</i>	83.17	75.7	$4.6 \cdot 10^{-55}$
<i>CaO₂</i>	78.2	3.0(<i>CaO</i> +1/2 <i>O₂</i> = <i>CaO₂</i>)	124
<i>BaO₂</i>	76.2	11.4(<i>BaO</i> +1/2 <i>O₂</i> = <i>BaO₂</i>)	$8.4 \cdot 10^{-7}$
<i>P₂O₅</i>	72.0	-	-
<i>H₂O</i>	68.37(жидк)	54.5	-
<i>FeO</i>	63.57	59.0	$2.1 \cdot 10^{-40}$
<i>Fe₃O₄</i>	66.4	-	$2.3 \cdot 10^{-40}$
<i>Fe₂O₃</i>	65.1	-	$1.6 \cdot 10^{-26}$
<i>MnO₂</i>	62.7	-	$2.2 \cdot 10^{-5}$
<i>Sb₂O₃</i>	55.7	49.9	-
<i>PbO</i>	52.07	45.05	$9.4 \cdot 10^{-21}$
<i>CO₂</i>	47.0(газ)	47.2	-
<i>CrO₃</i>	46.4	-	-
<i>Cu₂O</i>	40.6	34.5	$1.8 \cdot 10^{-22}$
<i>CuO</i>	39.85	-	$8.3 \cdot 10^{-15}$
<i>SO₂</i>	35.5(газ)	-	-
<i>SO₃</i>	34.7(жидк)	-	-
<i>PO₂</i>	32.2	-	-
<i>CO</i>	26.4(газ)	35.2(газ)	-

Так как термодинамически изменение свободной энергии зависит только от начального и конечного состояния системы и не зависит от пути, по которому система пришла от начального состояния в конечное, то легче всего будет окисляться тот элемент, который (в зависимости от того, исходить ли из Q , или из A_i , или P) или выделяет больше всего тепла, или у

которого наибольшая максимальная работа окисления, или наименьшая упругость диссоциации.

Исходя, например, из теплоты окисления, всякий элемент может восстанавливать окислы только тех элементов, которые расположены в ряду напряжений ниже его, и чем ниже расположен элемент, тем легче он восстанавливается.

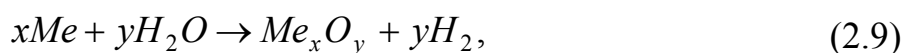
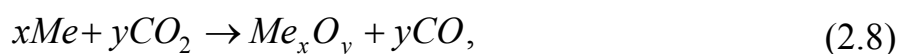
Для пиротехнических составов этим положением можно пользоваться только в случаях, когда эффект пиротехнического состава определяется в основном промежуточными продуктами, образующимися при горении составов. При высоких температурах ряд напряжений иной, чем при температурах, близких к нормальной. В таблице 2 приведены теплоты образования некоторых окислов в кристаллическом и газообразном состояниях.

Таблица 2 – Теплоты образования оксидов, ккал/г-атом O_2

Окисел	В кристаллическом состоянии (при 25°C)	В газообразном состоянии
CaO	151.7	29.0
SrO	140.8	-3.0 (+6.2)
Al_2O_3	131.1	86.6
SiO_2	102.8	60.0

Пиротехнические двухкомпонентные составы, содержащие органические горючие (смолы, масла и другие органические вещества), рассчитывают обычно или до CO_2 и H_2O (полное окисление), или до CO и H_2O (неполное окисление).

При расчете многокомпонентных ПС, содержащих и органическое и металлическое горючее, в особенности последнее, необходимо учесть, что при горении подобных составов CO_2 и H_2O не образуется, так как металлы, применяемые в ПС в качестве горючих, в газообразном состоянии легко окисляются CO_2 и H_2O :



3 РАСЧЕТ РЕЦЕПТУР ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ

Расчет рецептур сводится чаще всего к определению массовых долей компонентов, входящих в состав. При этом в простейших случаях не учитываются активности компонентов и наличие примесей.

3.1 Расчет через кислородные эквиваленты

Используемые формулы:

$$Г + Ок = ПР.РЕАКЦИИ$$

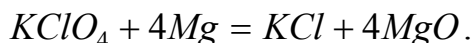
$$\%Гор = \frac{КЭ_{Гор}}{КЭ_{Ок} + КЭ_{Гор}} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

$$\%Ок = \frac{КЭ_{Ок}}{КЭ_{Ок} + КЭ_{Гор}} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

где $\%Me$, $\%Ок$ — процентное содержание горючего и окислителя соответственно, $КЭ_{Гор}$, $КЭ_{Ок}$ — кислородные эквиваленты горючего и окислителя соответственно.

Пример 1. Рассчитайте стехиометрическую смесь, состоящую из $KClO_4$ и Mg

Составляем уравнение реакции горения:



Находим по таблицам или рассчитываем кислородные эквиваленты:

Вещество	КЭ
$KClO_4$	2.17
Mg	1.52

Находим содержание компонентов:

$$\%KClO_4 = \frac{КЭ_{KClO_4}}{КЭ_{Mg} + КЭ_{KClO_4}} \cdot 100\% = \frac{2.17}{1.52 + 2.17} \cdot 100\% = 59\%,$$

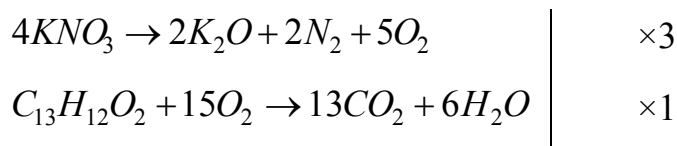
$$\%Mg = \frac{КЭ_{Mg}}{КЭ_{Mg} + КЭ_{KClO_4}} \cdot 100\% = \frac{1.52}{1.52 + 2.17} \cdot 100\% = 41\%.$$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
$KClO_4$	59
Mg	41

Пример 2. Рассчитать стехиометрическую смесь из KNO_3 и идитола ($C_{13}H_{12}O_2$).

Для написания уравнения горения этой смеси проще всего составить две реакции – разложение окислителя, и окисление горючего. Затем уровнять их по кислороду и написать суммарную реакцию горения.



Суммарная реакция:



Находим по таблицам или рассчитываем кислородные эквиваленты:

Вещество	КЭ
$C_{13}H_{12}O_2$	0.42
KNO_3	2.53

$$\%KNO_3 = \frac{KЭ_{KNO_3}}{KЭ_{Mg} + KЭ_{KNO_3}} \cdot 100\% = \frac{2.53}{2.53 + 0.42} \cdot 100\% = 86\%,$$

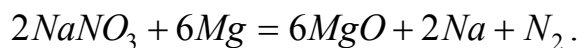
$$\%C_{13}H_{12}O_2 = \frac{KЭ_{C_{13}H_{12}O_2}}{KЭ_{Mg} + KЭ_{C_{13}H_{12}O_2}} \cdot 100\% = \frac{0.42}{2.53 + 0.42} \cdot 100\% = 14\%.$$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
$C_{13}H_{12}O_2$	86
KNO_3	14

Пример 3. Рассчитать смесь из $NaNO_3$ и Mg с кислородным балансом КБ равным -20

Составляем уравнение реакции горения:



Находим по таблицам или рассчитываем кислородные эквиваленты:

Вещество	КЭ
$NaNO_3$	1.77
Mg	1.52

Так как кислородный баланс отрицательный, то, в соответствии с определением, недостаток кислорода на 100 грамм смеси составит 20 грамм. Следовательно, избыток Mg составит:

$$m_{Mg} = KЭ_{Mg} \cdot m_{O_2} = 1.52 \cdot 20 = 30.4 \text{ гр.}$$

Оставшиеся $100 - 30.4 = 69.6$ гр приходятся на стехиометрический состав $NaNO_3$ и Mg

$$\%Mg = \frac{KЭ_{Mg}}{KЭ_{Mg} + KЭ_{NaNO_3}} \cdot 100\% = \frac{1.52}{1.52 + 1.77} \cdot 69.6\% = 32.2\%,$$

$$\%NaNO_3 = \frac{KЭ_{NaNO_3}}{KЭ_{Mg} + KЭ_{NaNO_3}} \cdot 100\% = \frac{1.77}{1.52 + 1.77} \cdot 69.6\% = 37.4\%.$$

С учетом избыточного Mg получается:

$$\%Mg = 32.2\% + 30.4\% = 62.6\%,$$

$$\%NaNO_3 = 37.4\%.$$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
$NaNO_3$	37.4
Mg	32.2

Пример 4. Рассчитать состав, состоящий из $NaNO_3$, Al и Mg при соотношении $Al:Mg = 1:2$ и КБ равным – 20

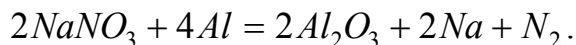
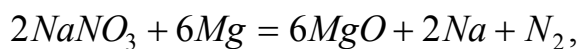
Находим по таблицам или рассчитываем кислородные эквиваленты:

Вещество	КЭ
$NaNO_3$	1.77

$$Mg \quad 1.52$$

$$Al \quad 1.12$$

Так как КБ отрицательный, уравнения горения примут вид:



Сначала рассчитываем избыток магния (т.к. КБ = -20, т.е. недостаток кислорода 20 грамм на 100 грамм смеси):

$m_{Mg} = KЭ_{Mg} \cdot m_{O_2} = 1.52 \cdot 20 = 30.4 \text{ гр}$. С учетом того, что расчет на 100 гр смеси $\%Mg = 30.4\%$.

По условию, соотношение $Al:Mg = 1:2$, количество Al , приходящееся на этот Mg :

$$\%Al = \frac{1 \cdot Mg}{2} = 15.2\% \text{ на окисление которого потребуется количество}$$

$NaNO_3$:

$$\%NaNO_3 = \frac{KЭ_{NaNO_3} \cdot \%Al}{KЭ_{Al}} = \frac{1.77 \cdot 15.2}{1.12} = 24\%.$$

Расчетная формула выводиться из определений кислородных

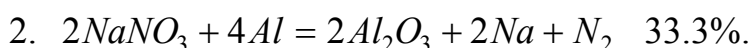
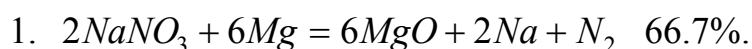
$$\text{эквивалентов: } \%Гор = \frac{KЭ_{Гор}}{KЭ_{Ок} + KЭ_{Гор}} \cdot 100\%, \quad \%Ок = \frac{KЭ_{Ок}}{KЭ_{Ок} + KЭ_{Гор}} \cdot 100\%,$$

$$\text{преобразуем: } KЭ_{Ок} + KЭ_{Гор} = \frac{KЭ_{Гор}}{\%Гор} \cdot 100\% = \frac{KЭ_{Ок}}{\%Ок} \cdot 100\%,$$

$$\text{следовательно } \frac{KЭ_{Гор}}{\%Гор} = \frac{KЭ_{Ок}}{\%Ок}, \quad \%Ок = \frac{KЭ_{Ок} \cdot \%Гор}{KЭ_{Гор}}.$$

На смесь $NaNO_3 - Al - Mg$ с КБ = 0 и соотношением $Al:Mg = 1:2$ остается: $100\% - 30.4\% - 15.2\% - 24\% = 30.4\%$.

Зная соотношение $Al:Mg = 1:2$ можно написать:



Таким образом, по первому уравнению:

$$\%NaNO_3 = \frac{KЭ_{NaNO_3}}{KЭ_{Mg} + KЭ_{NaNO_3}} \cdot 100\% \cdot \frac{66.7\%}{100\%} \cdot \frac{30.4\%}{100\%} = 10.9\%,$$

$$\%Mg = \frac{KЭ_{Mg}}{KЭ_{Mg} + KЭ_{NaNO_3}} \cdot 100\% \cdot \frac{66.7\%}{100\%} \cdot \frac{30.4\%}{100\%} = 9.4\%.$$

По второму:

$$\%NaNO_3 = \frac{KЭ_{NaNO_3}}{KЭ_{Al} + KЭ_{NaNO_3}} \cdot 100\% \cdot \frac{33.3\%}{100\%} \cdot \frac{30.4\%}{100\%} = 6.2\%,$$

$$\%Al = \frac{KЭ_{Al}}{KЭ_{Al} + KЭ_{NaNO_3}} \cdot 100\% \cdot \frac{33.3\%}{100\%} \cdot \frac{30.4\%}{100\%} = 3.9\%.$$

Конечная рецептура состава:

$$\%Al = 15.2 + 3.9 = 19.1\%,$$

$$\%Mg = 30.4 + 9.4 = 39.8\%,$$

$$\%NaNO_3 = 24 + 10.9 + 6.2 = 41.1\%.$$

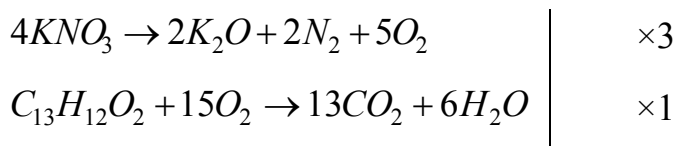
Ответ:

Вещество	Содержание, %
$NaNO_3$	41.1
Mg	39.8
Al	19.1

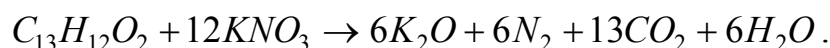
3.2 Расчет через молекулярные массы

Пример 5. Рассчитайте стехиометрическую смесь, состоящую из идиитола и KNO_3

Составляем реакции разложения окислителя и окисления горючего, уравниваем по кислороду:



Суммарная реакция горения:



Молекулярные массы веществ:

Вещество	Молекулярная масса
$C_{13}H_{12}O_2$	200
KNO_3	101.1

$$KNO_3 = \frac{12 \cdot 101}{12 \cdot 101 + 200} \cdot 100\% = 86\%,$$

$$C_{13}H_{12}O_2 = \frac{200}{12 \cdot 101 + 200} \cdot 100\% = 14\%.$$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
$C_{13}H_{12}O_2$	14
KNO_3	86

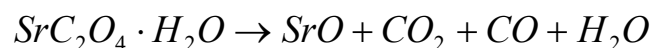
Пример 6. Рассчитать состав из $KClO_3$, $C_{13}H_{12}O_2$ и $SrC_2O_4 \cdot H_2O$ при содержании в составе 10% $SrC_2O_4 \cdot H_2O^*$ до полного окисления горючих с нулевым кислородным балансом.

* существует в виде гидрата

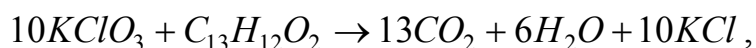
Молекулярные массы веществ:

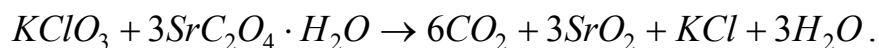
Вещество	Молекулярная масса
$C_{13}H_{12}O_2$	200
KNO_3	101.1
$SrC_2O_4 \cdot H_2O$	193.6

Оксалат стронция в данном составе можно рассматривать как горючее, т.к. при горении состава он распадается с образованием горючего вещества:



Данный состав можно рассматривать как смесь двухкомпонентных составов:

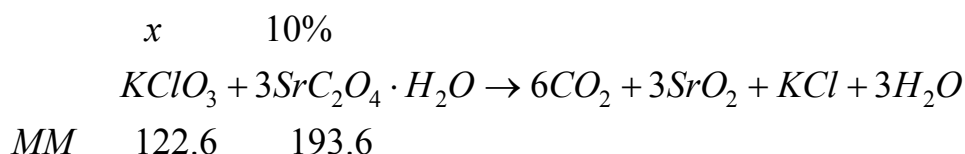




Последовательность расчета выглядит следующим образом.

1. По реакции горения $SrC_2O_4 \cdot H_2O$ рассчитать количество $KClO_3$ на 10% $SrC_2O_4 \cdot H_2O$ (первая смесь).
2. В остальной части смеси (т.е. в 100 в.ч.) рассчитать соотношение $KClO_3$ и $C_{13}H_{12}O_2$ при заданном кислородном балансе (вторая смесь).
3. Подсчитать окончательно количество компонентов (рецептуру состава).

По реакции горения



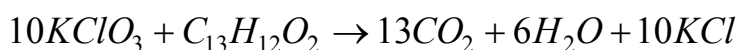
получается следующее количество хлората калия

$$\%KClO_3 = \frac{10\% \cdot 122.6}{3 \cdot 193.6} = 2.1\%.$$

Таким образом на смесь $KClO_3 + C_{13}H_{12}O_2$ остается:

$$100\% - 2.1\% - 10\% = 87.9\%.$$

По реакции горения



получается следующее соотношение компонентов

$$\%KClO_3 = \frac{10 \cdot 122.6}{10 \cdot 122.6 + 200} \cdot 87.9\% = 75.6\%,$$

$$\%C_{13}H_{12}O_2 = \frac{200}{10 \cdot 122.6 + 200} \cdot 87.9\% = 12.3\%.$$

Итого рецептура состава:

$$C_{13}H_{12}O_2 = 12.3\%,$$

$$\%KClO_3 = 75.6\% + 2.1\% = 77.7\%,$$

$$SrC_2O_4 = 10\%.$$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
$C_{13}H_{12}O_2$	12.3
$KClO_3$	77.7
$SrC_2O_4 \cdot H_2O$	10

Пример 7. Рассчитать состав, содержащий $Ba(NO_3)_2$, Mg и шеллак с КБ равным - 20 и при содержании в составе 6.0% шеллака.

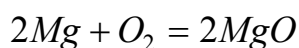
Так как состав содержит избыток горючих и одно из них является металлом (Mg), другое – органическим горючим, то при горении состава углерод шеллака перейдет в CO , а водород шеллака – в H_2

Молекулярные массы веществ:

Вещество	Молекулярная масса
Mg	24.32
$Ba(NO_3)_2$	261.38
Шеллак	296

Так как КБ= – 20, избыток магния составит:

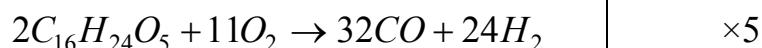
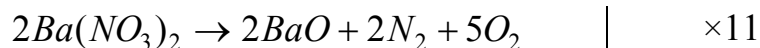
$$x = 20$$



$$24.32 \quad 32$$

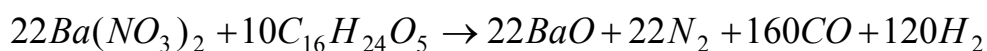
$$\%Mg = \frac{20 \cdot 24.32 \cdot 2}{32} = 30.4\%.$$

Для окисления 6% шеллака:



Суммарная реакция:

$$x \quad \quad \quad 6$$

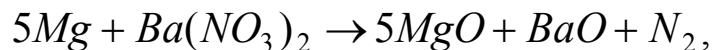


$$261.39 \quad \quad \quad 296$$

$$\%Ba(NO_3)_2 = \frac{6 \cdot 22 \cdot 261.39}{10 \cdot 296} = 11.7\%.$$

На состав $Mg + Ba(NO_3)_2$ остается:

$$100\% - 30.4\% - 6\% - 11.7\% = 51.9\%.$$



$$\%Mg = \frac{24.32 \cdot 5}{24.32 \cdot 5 + 261.38} \cdot 51.9\% = 16.5\%,$$

$$\%Ba(NO_3)_2 = \frac{261.38}{24.32 \cdot 5 + 261.38} \cdot 51.9\% = 35.4\%.$$

Конечная рецептура:

$$\%Ba(NO_3)_2 = 11.7\% + 35.4\% = 47.1\%,$$

$$\%Mg = 30.4\% + 16.5\% = 46.9\%,$$

$$\%шеллак = 6\%.$$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
Mg	46.9
$Ba(NO_3)_2$	47.1
Шеллак	6

Пример 8. Рассчитать состав, состоящий из порошка Zn , Fe_2O_3 и C_2Cl_6 с кислородным и хлорным балансом = 0 до продуктов: $ZnCl_2$, $FeCl_3$ и CO .

Молекулярные массы веществ:

Вещество	Молекулярная масса
Zn	65.38
Fe_2O_3	159.7
C_2Cl_6	237.02

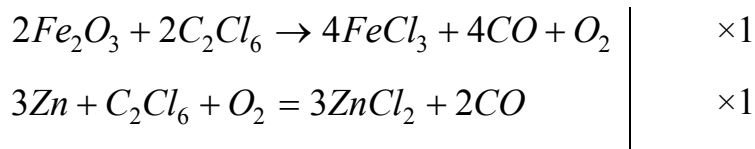
Приведенными выше способами рецептуру состава из заданных компонентов и с заданными балансами не рассчитать.

Рекомендуется следующий способ расчета.

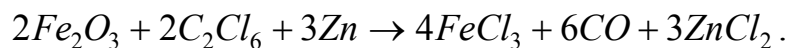
Расчет ведется как для двухкомпонентной смеси, но окислитель (по кислороду) и горючее (по кислороду) – составные (сложные).

Составной окислитель: $Fe_2O_3 + C_2Cl_6$.

Составное горючее: $Zn + C_2Cl_6 + O_2$.



Суммарная реакция:



Рецептура состава:

$$Zn = \frac{3 \cdot 65.38}{3 \cdot 65.38 + 2 \cdot 159.7 + 3 \cdot 237.02} \cdot 100\% = 16\%,$$

$$C_2Cl_6 = \frac{3 \cdot 237.02}{3 \cdot 65.38 + 2 \cdot 159.7 + 3 \cdot 237.02} \cdot 100\% = 58\%,$$

$$Fe_2O_3 = \frac{2 \cdot 159.7}{3 \cdot 65.38 + 2 \cdot 159.7 + 3 \cdot 237.02} \cdot 100\% = 26\%.$$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
Zn	16
Fe_2O_3	26
C_2Cl_6	58

3.3 Расчет рецептур через систему уравнений

В основе метода лежит составление системы уравнений.

В общем виде уравнение для расчета кислородного баланса выглядит следующим образом

$$KB = \frac{x}{KЭ_{ок}} - \frac{y}{KЭ_{гор}}, \quad (3.3)$$

где x, y — содержание окислителя и горючего в смеси соответственно.

Суммарное содержание компонентов в смеси равно 100%

$$x + y = 100. \quad (3.4)$$

Уравнения 3.3 и 3.4 образуют систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$\begin{cases} \frac{x}{KЭ_{ок}} - \frac{y}{KЭ_{гор}} = KB \\ x + y = 100 \end{cases} \quad (3.5)$$

Способ расчета является формализованным. Поэтому решению системы уравнений вида 3.5 может использоваться компьютер (программы Eureka, MathCAD, Microsoft Excel, Star Office Calc).

Пример 9. Рассчитать рецептуру стехиометрической смеси Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Al , причем массовое содержание Al_2O_3 равно 10% сверх 100%

Al_2O_3 является продуктом реакции горения исходной смеси и используется как инертное вещество для снижения температуры горения.

Вещество	КЭ	Содержание, %
Fe_2O_3	3.32	x
Al	1.12	y
Al_2O_3	—	z

Система уравнения будет выглядеть следующим образом

$$\begin{cases} x + y + z = 110 & \text{баланс по массе} \\ z = 10 & \text{содержание } Al_2O_3 \\ \frac{x}{3.32} - \frac{y}{1.12} = 0 & \text{кислородный баланс} \end{cases}$$

Решение системы: $x = 74.8$, $y = 25.2$, $z = 10$.

Так как ответ должен быть дан в процентах, приводим решение к 100%:

$$\begin{cases} x = \frac{74.8 \cdot 100}{110} = 68\% \\ y = \frac{25.2 \cdot 100}{110} = 22.9\% \\ z = \frac{10 \cdot 100}{110} = 9.1\% \end{cases}$$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
Fe_2O_3	68
Al	22.9
Al_2O_3	9.1

Пример 10. Рассчитать состав, состоящий из $Sr(NO_3)_2$, Mg , Al и стеарата кальция с КБ равным – 15 при содержании 4% стеарата кальция и соотношении $Mg: Al = 3:1$.

Вещество	КЭ	Содержание, %
$Sr(NO_3)_2$	2.2	x
Mg	1.52	y
Al	1.12	z
$(C_{17}H_{35}COO)_2Ca$	1.15	f

Система уравнения будет выглядеть следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{ll} x + y + z + f = 100 & \text{баланс по массе} \\ f = 4 & \text{содержание стеарата кальция} \\ \frac{y}{z} = \frac{3}{1} & \text{соотношение } Mg : Al \\ \frac{x}{2.2} - \frac{y}{1.52} - \frac{z}{1.12} - \frac{f}{1.15} = -15 & \text{кислородный баланс} \end{array} \right.$$

Решение системы $x = 49.3\%$, $y = 35.2\%$, $z = 11.5\%$, $f = 4\%$

Ответ:

Вещество	Содержание, %
$Sr(NO_3)_2$	49.3
Mg	35.2
Al	11.5
$(C_{17}H_{35}COO)_2Ca$	4

3.4 Рецептуры с лаковой составляющей

Пример 11. Рассчитать рецептуру состава и лаковой составляющей $Pb(CNS)_2$, $KClO_4$, коллоксилинс кислородным балансом $KB = 0$. В состав входит 3% коллоксилина. Коллоксилин вводится в виде 5% раствора в ацетоне.

Последовательность расчета выглядит следующим образом.

1. Расчет приготавливаемого лака.
2. Расчет сухой смеси $Pb(CNS)_2 + KClO_4$.
3. Расчет количества лака, которое необходимо добавить к смеси.

Расчет лака будем вести на 100 г готового раствора.

Тогда количество коллоксилина будет $m_{\text{коллоксилин}} = 5$ г, ацетона — $m_{\text{ацетон}} = 95$ г.

Для приготовления лакового раствора необходимо рассчитать объем ацетона

$$V_{\text{ацетон}} = \frac{m_{\text{ацетон}}}{\rho_{\text{ацетон}}} = \frac{95}{0,791} = 120 \text{ мл}.$$

Вещество	КЭ	Содержание, %
$Pb(CNS)_2$	1.444	x
$KClO_4$	2.164	y

Система уравнения для двойной смеси роданид свинца — перхлорат калия

$$\begin{cases} \frac{y}{2.164} - \frac{x}{1.444} = KB \\ x + y = 100 \end{cases}.$$

Содержание $Pb(CNS)_2$ $x = 40\%$, $KClO_4$ — $y = 60\%$.

Далее рассчитаем количество лака, которое необходимо добавить к 10 г сухой смеси $Pb(CNS)_2 + KClO_4$.

Масса коллоксилина необходимая для 10 г состава

$$m_{\text{коллоксилин}} = \frac{10 \cdot 3}{100} = 0.3 \text{ г}.$$

Для расчета количества ацетона, содержащегося в лаке с 0.3 граммами коллоксилина составим пропорцию

Вещество	Масса, г	Содержание %
Коллоксилин	0.3	5
Ацетон	x	95

$$m_{\text{ацетон}} = x = \frac{0.3 \cdot 95}{5} = 5.7 \text{ г.}$$

Рассчитаем объем лака, который необходимо добавить к 10 г состава.

$$V_{\text{коллоксилин}} = \frac{m_{\text{коллоксилин}}}{\rho_{\text{коллоксилин}}} = \frac{0.3}{1.600} = 0.188 \text{ мл.}$$

$$V_{\text{ацетон}} = \frac{m_{\text{ацетон}}}{\rho_{\text{ацетон}}} = \frac{5.7}{0.791} = 7.206 \text{ мл.}$$

$$V_{\text{лак}} = V_{\text{коллоксилин}} + V_{\text{ацетон}} = 0.188 + 7.206 = 7.394 \text{ мл.}$$

3.5 Обеспеченность пиротехнической смеси кислородом

Многие ПС, кроме кислородного баланса, характеризуют еще обеспеченностью кислородом. Обеспеченность ПС кислородом вычисляют по соотношению

$$\alpha = \frac{m_{\text{ок}}}{m_{\text{гор}}} \quad (3.6)$$

где $m_{\text{ок}}$ – количество активного кислорода, содержащееся в окислителях в 100 г пиротехнического состава; $m_{\text{гор}}$ – количество кислорода, необходимого для окисления горючих, содержащихся в 100 г пиротехнического состава.

Пример 12. Вычислить кислородный баланс (КБ) и обеспеченность кислородом (α) у смесей, указанных в таблице 3.

Таблица 3 – Теплоты образования оксидов, ккал/г-атом O₂

Компонент	Содержание, %				
	№1	№2	№3	№4	КЭ
<i>KClO₄</i>	50.0	27	63	35	2.16
<i>KNO₃</i>	8.6	8	7	5	2.11
<i>Mg</i>	41.4	65	30	45	1.52
<i>Al</i>	–	–	–	15	1.12

Смесь 1

$$KB = \frac{50}{2.16} + \frac{8.6}{2.11} - \frac{41.4}{1.52} = 0,$$

$$\alpha = \frac{\frac{50}{2.16} + \frac{8.6}{2.11}}{\frac{41.4}{1.52}} = 1.$$

Смесь 2

$$KB = \frac{27}{2.16} + \frac{8}{2.11} - \frac{65}{1.52} = -26,$$

$$\alpha = \frac{\frac{27}{2.16} + \frac{8}{2.11}}{\frac{65}{1.52}} = 0.382.$$

Смесь 3

$$KB = \frac{63}{2.16} + \frac{7}{2.11} - \frac{30}{1.52} = 12.7,$$

$$\alpha = \frac{\frac{63}{2.16} + \frac{7}{2.11}}{\frac{30}{1.52}} = 1.65.$$

Смесь 4

$$KB = \frac{35}{2.16} + \frac{5}{2.11} - \frac{45}{1.52} - \frac{15}{1.12} = -24.4,$$

$$\alpha = \frac{\frac{35}{2.16} + \frac{5}{2.11}}{\frac{45}{1.52} + \frac{15}{1.12}} = 0.43.$$

Ответ:

Состав	КБ	α
№1	0	1
№2	-26	0.38
№3	12.7	1.65
№4	-24.4	0.43

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1 (СПРАВОЧНОЕ). СРОДСТВО ЭЛЕМЕНТОВ К
КИСЛОРОДУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛОТЫ
ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛОВ**

Реакция образования окислов	Сродство элементов при температуре (°C), ккал/моль							Теплота образования, ккал/моль	
	27	427	1027	1500	2027	2227	Газ.	Тв.	Газ.
$2Ca+O_2=2CaO$	288.8	274.0	138.9	221.0	166.0	143.0	—	303.8	+58.0/ 62.0
$2Be+O_2=2BeO$	278.0	—	—	—	—	—	-11.4	292.0	-23.6
$2Mg+O_2=2MgO$	272.0	259.0	226.0	189.0	126.0	105.0	—	286.0	+52.0/ +16.6
$2SrO+O_2=2SrO_2$	268.0	—	—	—	—	—	—	282.0	+12.4
$2Ba+O_2=2BaO$	253.0	230.0	205.0	185.0 (1400°)	—	—	—	266.8	14.5
$4/3Al+O_2=2/3Al_2O_3$	251.0	226.0	200.0	186.0	156.0	140.0		266.0	+173.2/ +118.66 (Al_2O_3)- 90.6
$Zr+O_2=ZrO_2$	244.0	230.0	205.0	190.0	180.0 (1800°)			258.2	-27.2 (ZrO)
$Ti+O_2=TiO_2$	204.0	183.0	164.0	143.0	122.0	—	—	218.0	-53.2 (TiO)
$Si+O_2=SiO_2$	196.0	178.0	152.0	148.0	115.0	108.0	+65.5 (SiO)	205.4	+53.2 (SiO)
$4/3B+O_2=2/3B_2O_3$	188.0	185.0	176.0	167.0	147.0 (1680°)	—	+23.2 (BO)	201.4	+10.6 (BO) +144.0 (B_2O_3)
$4Na+O_2=2Na_2O$	180.0	150.0	110.0	—	—	—	—	198.8	—
$2Mn+O_2=2MnO$	174.0	160.0 (677°)	138.0	136.0	104.0	—	—	184.0	-69.2
$4/3Cr+O_2=2/3Cr_2O_3$	167.0	150.0	124.0	105.0	85.4	—	—	179.8	-130.0 (CrO)
$2Zn+O_2=2ZnO$	152.0	130.0	100.0	50.0	—	—	—	166.34	—
$2Fe+O_2=2FeO$	119.0	106.0	84.0	74.0	60.0	—	—	127.14	-126.6
$2Pb+O_2=2PbO$	91.0	70.0	38.0	8.0	—	—	—	104.14	-57.8
$2C+O_2=2CO$	63.0	83.0	109.0	124.0	152.0	160.0	—	—	+52.8
$4Cu+O_2=2Cu_2O$	61.0	55.0	34.0	24.0	8.0	—	—	79.0	-70.0

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2 (СПРАВОЧНОЕ). КИСЛОРОДНЫЕ
ЭКВИВАЛЕНТЫ ОКИСЛИТЕЛЕЙ**

Окислитель	Формула	ММ	Полное восстановление			Неполное восстановление		
			%O ₂	Экви-валент	Продук-ты	%O ₂	Экви-валент	Продук-ты
Нитраты								
Нитрат аммония	NH_4NO_3	80.05	20.0	5.0	N_2, H_2O	—	—	—
Нитрат бария	$Ba(NO_3)_2$	261.39	30.7	2.72	Ba	30.6	3.27	BaO
Нитрат калия	KNO_3	101.10	47.5	2.11	K	39.6	2.53	K_2O
Нитрат лития	$LiNO_3$	68.95	69.7	1.44	Li	58.0	1.72	Li_2O
Нитрат натрия	$NaNO_3$	85.0	56.4	1.77	Na	47.0	2.13	Na_2O
Нитрат свинца	$Pb(NO_3)_2$	331.23	29.0	3.45	Pb	24.18	4.14	PbO
Нитрат стронция	$Sr(NO_3)_2$	211.65	45.5	2.2	Sr	37.9	2.64	SrO
Хлораты								
Хлорат бария	$Ba(ClO_3)_2$	304.3		3.17	$BaCl_2$			
Хлорат бария(вод)	$Ba(ClO_3)_2 \cdot H_2O$	322.28	29.7	2.35	$BaCl_2, H_2O$			
Хлорат калия	$KClO_3$	122.55	39.2	2.55	KCl	—	-	—
Хлорат натрия	$NaClO_3$	106.44		2.22	$NaCl$			
Перхлораты								
Перхлорат аммония	NH_4ClO_4	117.5	68.3	2.94	N_2, HCl, H_2O	27.2	7.35	H_2O, NO, Cl_2
Перхлорат аммония	NH_4ClO_4	117.5	54.5	3.68	N_2, Cl_2, H_2O	—	—	—
Перхлорат калия	$KClO_4$	138.55	46.3	2.16	KCl	—	—	—
Перхлорат лития	$LiClO_4$	106.4	60.1	1.66	$LiCl$	—	—	—
Перхлорат натрия	$NaClO_4$	122.45	52.27	1.91	$NaCl$	—	—	—
Оксиды, пероксиды								
Перекись бария 100%	BaO_2	169.36	18.9	5.3	Ba	9.45	10.58	BaO
Перекись бария 85%	BaO_2	169.36	17.7	5.95	Ba	8.05	12.4	BaO
Перекись бария 80%	BaO_2	169.36	46.14	6.16	Ba	7.55	13.15	—

Окислитель	Формула	ММ	Полное восстановление			Неполное восстановление		
			%O ₂	Экви-валент	Продукты	%O ₂	Экви-валент	Продукты
Перекись стронция 100%	SrO_2	119.68	26.8	3.72	Sr	13.4	7.46	SrO
Перекись стронция 80%	SrO_2	119.68	24.48	4.2				
Окись железа	Fe_2O_3	159.7	30.5	3.32	Fe	—	—	—
Железная окалина	Fe_3O_4	231.55	27.7	3.61	Fe	—	—	—
Двуокись марганца	MnO_2	86.93	36.9	2.73	Mn	18.4	6.43	MnO
Двуокись свинца	PbO_2	239.21	13.4	7.46	Pb	6.7	14.92	PbO
Свинцовы й сурик	Pb_3O_4	685.63	9.32	10.75	Pb	2.33	43.0	PbO
Хром (3) окись	Cr_2O_3	152.02	31.4	3.17	Cr	—	—	—
Хром (6) ангидрид	Cr_2O_3	100.01	48.0	2.08	Cr	24.0	4.16	Cr_2O_3
Окись кремния	SiO_2	60.10	53.4	1.88	Si			
Перманганат калия	$KMnO_4$	158.03	40.3	2.47	K, Mn	25.3	3.94	K_2O, MnO
Хроматы								
Хромовокислый барий	$BaCrO_4$	253.4	26.3	3.96	Ba, Cr	9.46	10.50	BaO, Cr_2O_3
Хромовокислый барий	$BaCrO_4$	253.4				18.9	5.27	BaO, Cr_2O_3
Двухромовокислый барий	$K_2Cr_2O_7$	294.21	33.0	2.63	K, Cr	16.3	6.13	K_2O, Cr_2O_3
Хромовокислый свинец	Pb_2CrO_4	323.19					8.1	Pb, Cr_2O_3
Сульфаты								
Сульфат калия	K_2SO_4	174.25	36.7	2.72	K_2S			
Сульфат кальция	$CaSO_4$	145.14	44.2	2.27	CaS, H_2O			
Сульфат бария	$BaSO_4$	233.39					3.65	BaS
Галогенсодержащие								
Гексахлорэтан	C_2Cl_6	236.76		1.11	C			
Гексахлорбензол	C_6Cl_6	284.81		1.34	C			
Фторопласт-4	(C_2F_2)	—		1.32	C			

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3 (СПРАВОЧНОЕ). КИСЛОРОДНЫЕ
ЭКВИВАЛЕНТЫ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Горючее	Формула	ММ	Полное восстановление		Неполное восстановление	
			Эквива- лент	Продук- ты	Эквива- лент	Продук- ты
Металлы						
Литий	<i>Li</i>	6.94	0.87	<i>Li₂O</i>		
Магний	<i>Mg</i>	24.32	1.52	<i>MgO</i>	—	—
Натрий	<i>Na</i>	22.99	0.55	<i>Na₂O</i>		
Алюминий	<i>Al</i>	26.97	1.12	<i>Al₂O₃</i>	—	—
Кремний	<i>Si</i>	28.06	0.83	<i>SiO₂</i>	—	—
Железо	<i>Fe</i>	55.84	2.32	<i>Fe₂O₃</i>	2.62	<i>FeO</i>
Сурьма	<i>Sb</i>	121.76	3.04	<i>Sb₂O₅</i>	5.08	<i>SbO</i>
Церий	<i>Ce</i>	140.13	4.38	<i>CeO</i>	—	—
Цирконий	<i>Zr</i>	91.22	2.85	<i>ZrO₂</i>	—	—
Титан	<i>Ti</i>	47.9	1.49	<i>TiO₂</i>	—	—
Бор	<i>B</i>	10.82	0.45	<i>B₂O₃</i>	—	—
Бериллий	<i>Be</i>	9.02	0.56	<i>BeO</i>	—	—
Ванадий	<i>V</i>	50.94	1.27	<i>V₂O₅</i>		
Марганец	<i>Mn</i>	54.93	3.43	<i>MnO</i>		
Железо	<i>Fe</i>	55.84	2.33	<i>Fe₂O₃</i>	3.42	<i>FeO</i>
медь	<i>Cu</i>	63.54	3.96	<i>CuO</i>		
Цинк	<i>Zn</i>	65.38	4.07	<i>ZnO</i>		
Ниобий	<i>Nb</i>	92.9	2.32	<i>Nb₂O₅</i>		
Молибден	<i>Mo</i>	95.94	3	<i>Mo₂O₃</i>		
Олово	<i>Sn</i>	118.6	3.7	<i>SnO₂</i>		
Сплавы						
Сплав <i>AM/1:1/</i>	—	-	1.29	<i>MgO, Al₂O₃</i>	—	—
Сплав <i>FeSi</i> (75%)	—	-	1.03	<i>Fe₂O₃, SiO₂</i>	—	—
Сплав <i>Si</i> и <i>Ca</i>	—	-	1.35	<i>SiO₂, CaO</i>	—	—
Неметаллы						
Уголь древесный	<i>C₈H₅O</i>	117.1	0.39	<i>CO₂, H₂O</i>	0.69	<i>CO, H₂O</i>
Графит	<i>C</i>	12.01	0.37	<i>CO₂</i>	0.75	<i>CO</i>
Фосфор	<i>P</i>	38.98	0.77	<i>P₂O₅</i>	1.29	<i>P₂O₃</i>
Сесквидельфид фосфора	<i>P₄S₃</i>	220.1	0.85	<i>P₂O₅, SO₂</i>	1.14	<i>P₂O₃, SO₂</i>
Сера	<i>S₈</i>	256.18	-	-	1.0	<i>SO₂</i>

Горючее	Формула	ММ	Полное восстановление		Неполное восстановление	
			Эквивалент	Продукты	Эквивалент	Продукты
Антимонит	Sb_2S_3	339.8	-	-	2.36	Sb_2O_3, SO_2
Пирит	FeS_2	120	0.68	Fe_2O_3, SO_2		
Свинец роданистый	$Pb(CNS)_2$	323.2	2.25	CO_2, O_2, N_2, PbO	2.89	CO, SO_2, N_2, Pb
Медь роданистая	$Cu(CNS)_2$	121.65	1.52	CuO, CO_2, O_2, N_2	2.17	Cu_2O, CO, SO_2, N_2
Аммоний хлористый	NH_4Cl	53.5	1.60	H_2O, N_2, Cl_2	—	—
Оксалат натрия	$Na_2C_2O_4$	134.0	8.37	Na_2O	—	—
Оксалат стронция	$SrC_2O_4 \cdot H_2O$	193.67	12.1	SrO, CO_2	—	—
Красная кровяная соль	$K_3[Fe(CN)_6]$	329.25	2.42	K_2O, FeO, CO, N_2		
Карбиды металлов						
Карбид циркония	ZrC	103.23	1.61	ZrO_2, CO_2		
Карбид титана	TiC	59.91	0.94	TiO_2, CO_2		
Карбид вольфрама	WC	62.96	1.12	V_2O_5, CO_2		
Карбид хрома	Cr_2C_3	180.05	1.32	Cr_2O_3, CO_2		

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4 (СПРАВОЧНОЕ). КИСЛОРОДНЫЕ
ЭКВИВАЛЕНТЫ ОРГАНИЧЕСКИХ ГОРЮЧИХ**

Горючее	Формула (мономер)	ММ	CO ₂ и H ₂ O	CO и H ₂ O	CO и H ₂
Канифоль	$C_{20}H_{30}O_2$	302.3	0.35	0.57	1.05
Шеллак	$C_{16}H_{24}O_5$	296.2	0.47	0.80	1.68
Асфальтит		98.52	0.29	0.428	0.92
Олифа	$C_{16}H_{26}O_2$	250.2	0.36	0.60	1.12
Масло касторовое	$C_{21}H_{42}O_5$	374.55	0.403	0.633	1.46
Масло минеральное	85% C; 12.5% H ₂ ; 10% O ₂ и N ₂		0.38	0.606	1.19
Пентаэритрит	$C_5H_{12}O_4$	136.14	0.71	1.21	8.5
Парафин	$C_{24}H_{50}$	338.64	0.29	0.43	0.88
Стеарин	$C_{17}H_{35}COOH$	284.45	0.34	0.52	1.11
Стеарат кальция	$(C_{17}H_{35}COO)_2Ca$	606.94	0.37	0.56	1.15
Уротропин	$(CH_2)_6N_4$	140.19	0.48	0.73	1.45
Нафталин	$C_{10}H_8$	128.17	0.33	0.57	0.8
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	178.06	0.34	0.58	0.79
Сахар свекловичный	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342.29	0.89	1.78	21.40
Сахар молочный	$C_{12}H_{22}O_{11} \cdot H_2O$	360.29	0.92	1.87	0
Крахмал	$(C_6H_{10}O_5)$	162.14	0.84	1.63	10.10
Метальдегид	(CH_3CHO)	43.03	0.55	0.91	2.7
Дициандиамид	$NH_2CNHNHCSN$	84.06	0.68	1.31	2.61
Резинат кальция 90%	$(C_{19}H_{29}COO)_2Ca$	643.3- 90%	0.38	0.60	1.11
Идитол	$C_{13}H_{12}O_2$	200.2	0.42	0.74	1.14
Бакелит	$C_{12}H_{11}O_2$	187.00	0.44	0.78	1.22
Поливинилформаль	$(-CH_2-\underset{\substack{ \\ O-CH_2-O}}{CH}-CH_2-\underset{ }{CH}-CH_2-)_{n-}$	114.14	0.47	0.79	1.78
Полиметилметакрилат		100.11	0.52	0.89	2.08
Поливинилбутираль		157.22	0.41	0.65	0.41
Поливинилхлорид	(C_2H_3Cl)	60.5	0.71	1.12	1.96
Каучук полиизобутиленовый		168.32	0.354	0.438	0.876
Каучук бутадиеновый		108.18	0.307	0.483	0.845
Тиокол жидкий	$(C_5H_{11}O_2S)$	312.64	0.70	0.815	0.98

Кафедра высокоэнергетических процессов

Расчет рецептур пиротехнических составов

Методические указания к лабораторным работам

Лев Николаевич Свиридов
Александр Александрович Осыка
Дмитрий Владимирович Королев

Отпечатано с оригинал макета. Формат 60×90. ¹/₁₆.

Печ. л. 2. Тираж 50 экз.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 26