А.А. Шидловский

Основы пиротехники

Издание четвёртое, переработанное и дополненное

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 030
ББК 92
А11

А.А. Шидловский
А11 Основы пиротехники: Издание четвёртое, переработанное и дополненное / А. А. Шидловский – М.: Книга по Требованию, 2026. – 321 с.

ISBN 978-5-524-06687-9

Четвертое издание книги по сравнению с прежними изданиями переработано и содержит материалы, отражающие достижения пиротехники за последние годы. В книге излагаются общие теоретические основы пиротехники, описываются свойства компонентов, горючих и окислителей, современные методы составления и расчета пиротехнических составов, даются сведения о свойствах пиротехнических составов. Большое внимание уделено физической природе рассматриваемых процессов горения. Отдельно рассматриваются свойства различных видов пиротехнических составов (осветительных, зажигательных, твердого ракетного топлива и др.).

Книга является учебным пособием для студентов втузов. Она также представляет интерес для научных работников и инженеров, работающих в области пиротехники и в смежных с ней областях.

ISBN 978-5-524-06687-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2026
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2026

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс
www.samizday.ru/reprint

Часть первая

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

ГЛАВА I

ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ О ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ И СОСТАВАХ

Слово «пиротехника» произошло от греческих слов: пир — огонь и техне — искусство, уменье.

Пиротехника — это наука о свойствах пиротехнических (огневых) составов и изделий из них и способах их изготовления.

Пиротехнические составы при сжигании (или взрыве) дают световой, тепловой, дымовой, звуковой или реактивный эффекты, используемые в военной технике и в ракетах различного назначения.

Применению пиротехнических составов в народном хозяйстве (в промышленности, на транспорте, при научных исследованиях и др.) посвящена XXI глава; там же сообщаются некоторые сведения о фейерверочных составах.

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Пиротехническими составами снаряжают следующие виды средств военного назначения:

1) осветительные средства (авиабомбы, артиллерийские снаряды, авиационные факелы и др.), используемые для освещения местности в ночных условиях;

2) фотоосветительные средства (фотобомбы, фотопатроны), используемые при ночной аэрофотосъемке и для других целей;

3) трассирующие средства, делающие видимой траекторию полета пуль и снарядов (и других подвижных объектов) и тем самым облегчающие пристрелку по быстро движущимся целям;

4) средства инфракрасного излучения, используемые для слежения за полетом ракет и в качестве ложных целей [23];

5) ночные сигнальные средства (патроны и др.), применяемые для подачи сигналов;

6) дневные сигнальные средства (патроны и др.), используемые для той же цели, но в дневных условиях;

7) зажигательные средства (бомбы, снаряды, пули и многие др.), служащие для уничтожения военных объектов противника;

8) маскирующие средства (дымовые шашки, снаряды и др.), употребляемые для получения дымовых завес;

9) ракеты различного назначения и дальности полета, использующие твердое пиротехническое топливо;

10) учебно-имитационные средства, употребляемые как на маневрах и ученьях, так и в боевой обстановке. Они имитируют действие атомных бомб, фугасных снарядов и бомб, а также различные явления на поле боя: орудийные выстрелы, пожары и др., и могут этим дезориентировать службу наблюдения противника;

11) целеуказательные средства (снаряды, бомбы и др.), указывающие местонахождение объектов противника;

12) пиротехнические газогенераторы, используемые для различных целей.

Пиротехнические составы используются также и в различных областях народного хозяйства.

К пиротехническим составам военного назначения можно отнести следующие:

1) осветительные;
2) фотоосветительные (фотосмеси);
3) трассирующие;
4) инфракрасного излучения;
5) зажигательные;
6) ночных сигнальных огней;
7) цветных сигнальных дымов;
8) маскирующих дымов;
9) твердое пиротехническое топливо;
10) безгазовые (для замедлителей);
11) газогенерирующие;
12) воспламенительные, содержащиеся в небольшом количестве во всех пиротехнических средствах;
13) прочие: имитационные, свистящие и др.

Многие составы применяются в самых различных видах средств; так, например, осветительные составы часто используют в трассирующих средствах; составы маскирующих дымов могут быть использованы и в учебно-имитационных средствах и т. д.

Пиротехнические составы можно также классифицировать по характеру процессов, протекающих при их горении.

Пламенные составы

1. Белопламенные.
2. Цветнопламенные.
3. Составы инфракрасного излучения.

Тепловые составы

1. Термитно-зажигательные.
2. Безгазовые (малогазовые).

Дымовые составы

1. Белого и черного дыма.
2. Цветного дыма.

Вещества и смеси, сгорающие за счет кислорода воздуха

1. Металлы и сплавы металлов.
2. Фосфор, его растворы и сплавы.
3. Смеси нефтепродуктов.
4. Различные вещества и смеси, загорающиеся при соприкосновении с водой или воздухом.

§ 2. ГОРЕНИЕ СОСТАВОВ

В форме горения могут протекать высокоэкзотермические химические реакции. Наблюдаемое при этом в большинстве случаев образование пламени (или свечение) не является, однако, непременным признаком горения; так, например, при горении дымовых составов пламени и выделения света не наблюдается.

Процесс горения характеризуется:

1) наличием подвижной зоны реакции, имеющей высокую температуру (сотни и тысячи градусов) и отделяющей еще не прореагировавшие (холодные) вещества от продуктов реакции;

2) отсутствием скачка давления в зоне реакции (в пламени); этим процессы горения существенно отличаются от процессов взрыва.

Горение пиротехнического состава — это окислительно-восстановительная реакция, в которой окисление горючих идет одновременно с восстановлением окислителей.

По степени гомогенности начальной системы различают несколько видов горения: горение твердого или жидкого топлива за счет кислорода воздуха — это *гетерогенное* горение. Горение взрывчатых газовых (или жидких) смесей или индивидуальных взрывчатых веществ — это горение *гомогенное.*

Пиротехнические составы — механические смеси твердых, тонко измельченных компонентов — по степени гомогенности находятся посередине между конденсированным топливом и индивидуальными веществами (или гомогенными смесями).

Степенью гомогенности определяются многие свойства пиротехнических составов.

Горение пиротехнических составов осуществляется теплопередачей из зоны реакции к слоям, в которых идет подготовка к процессу горения. На том же принципе основано и воспламенение пиросоставов. Для возникновения горения необходимо создать местное повышение температуры в составе; это до-

стигается обычно непосредственным воздействием на состав горячих пороховых газов или применением специальных воспламенительных составов.

Когда пиросостав приводится в действие огневым импульсом и горение его происходит в открытом пространстве, то скорость горения его невелика (обычно несколько мм/с).

Если же горение происходит в замкнутом пространстве или если в качестве инициатора используется капсюль-детонатор, то может возникнуть взрыв (скорость которого измеряется сотнями, а иногда и тысячами м/с).

В некоторых случаях ускорение горения наблюдается и при сгорании в открытом пространстве большого количества пиротехнических составов.

Для изготовления состава и снаряжения им изделия или средства проводятся следующие операции:

1) подготовка компонентов (измельчение, сушка);

2) приготовление состава (смешение компонентов);

3) уплотнение и формование состава (прессованием или иным способом);

4) снаряжение им изделия.

Для нормального действия состава необходимо, чтобы компоненты его были тонко измельчены и равномерно смешаны. В хорошо изготовленном составе, за исключением термита, частицы компонентов обычно уже неразличимы простым глазом.

Уплотнением состава достигается замедление горения, уменьшение объема, занимаемого им в изделии, и сообщение составу большой механической прочности. В большинстве изделий составы используются в уплотненном (спрессованном) виде.

Подготовка компонентов чаще всего неопасна, так как взятые в отдельности компоненты составов в большинстве случаев нечувствительны к механическим воздействиям (удару, трению) и не обладают взрывчатыми свойствами.

Однако этого нельзя сказать о горючих, рассеянных в воздухе в виде пыли. Известны случаи взрывов алюминиевой пыли. В некоторых случаях удар или трение могут вызвать воспламенение горючих. Так, например, наблюдалось воспламенение красного фосфора при протирании его через металлические сита.

Исключением являются также окислители — перхлорат аммония, нитрат аммония и хлораты металлов, которые даже в чистом виде без горючих примесей при наличии мощного начального импульса могут дать взрыв.

Смеси окислителей с горючими, т. е. пиросоставы, чувствительны к механическим импульсам и при ударе или трении могут загореться. Иногда при ударе или трении может возникнуть взрыв. Поэтому приготовление и прессование составов, как правило, являются опасными операциями.

§ 3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПИРОТЕХНИЧЕСКИМ СРЕДСТВАМ И СОСТАВАМ

Основное требование — это получение при действии пиротехнического средства максимального специального эффекта Для различных средств специальный эффект обуславливается различными факторами. Этот вопрос подробно разбирается при описании свойств отдельных категорий составов и средств. Здесь же приводится только несколько примеров.

Для трассирующих средств специальный эффект определяется хорошей видимостью полета пули или снаряда. Видимость, в свою очередь, определяется силой света пламени и зависит также от цвета пламени.

Для зажигательных средств хороший специальный эффект обуславливается (при наличии подходящей конструкции боеприпасов) созданием достаточно большого очага пожара, высокой температурой пламени, достаточным временем горения состава, а также количеством и свойствами шлаков, получающихся при горении.

Для маскирующих дымовых средств специальный эффект определяется созданием возможно бо́льшей, густой и устойчивой дымовой завесы.

Пиротехнические средства не должны представлять опасности при обращении с ними и хранении. Получаемый при их действии эффект не должен ухудшаться после длительного хранения.

Материалы, используемые для изготовления пиротехнических средств, должны быть по возможности недефицитны. Технологический процесс изготовления должен быть простым, безопасным и допускающим механизацию и автоматизацию производства.

Пиротехнические составы должны обладать следующими качествами:

1) давать максимальный специальный эффект[1] при минимальном расходовании состава;

2) иметь по возможности бо́льшую плотность (и в порошкообразном, и в прессованном виде);

3) сгорать равномерно с определенной скоростью;

4) обладать химической и физической стойкостью при длительном хранении;

5) иметь возможно меньшую чувствительность к механическим импульсам;

6) не быть чрезмерно чувствительными к тепловым воздействиям (не воспламеняться при небольшом подъеме температуры, при попадании искры и т. п.);

---

[1] Эффективность действия определяется не только рецептом состава, но также конструкцией изделия и внешними условиями (давление, температура), при которых происходит сгорание состава.

7) иметь минимальные взрывчатые свойства; редкие случаи, когда наличие взрывчатых свойств необходимо, будут оговорены ниже;

8) иметь несложный технологический процесс изготовления;

9) не содержать в себе компонентов, оказывающих токсическое действие на человеческий организм.

Изделия из пиротехнических составов (шашки, факелы) должны обладать достаточной механической прочностью, отвечающей требованиям эксплуатации.

При разработке новых составов необходимо в каждом отдельном случае тщательно продумать выбор горючего и окислителя и рассчитать количественные соотношения между ними, при этом следует учитывать и их физико-химические свойства.

Разработка составов значительно усложняется еще и тем, что для удовлетворения всех требований в большинстве случаев к двойной смеси (окислитель — горючее) приходится добавлять еще и другие компоненты.

§ 4. НАЗНАЧЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ

В пиротехнические составы входят следующие компоненты:

а) горючие;

б) окислители;

в) связующие (цементаторы) — органические полимеры, обеспечивающие механическую прочность уплотненных (спрессованных) составов;

г) ускорители и замедлители горения;

д) флегматизаторы — добавки, уменьшающие чувствительность составов к трению или удару;

е) вещества технологического назначения (жирующие добавки, растворители для связующих и др.).

Кроме того, в составы сигнальных огней вводятся вещества, сообщающие окраску пламени, а в дымовые составы — дымообразующие вещества.

В некоторых случаях один и тот же компонент может выполнять в составе несколько различных функций. Так, например, связующие всегда выполняют в составе функции горючих, а иногда и замедлителей горения.

В сигнальных составах нитрат стронция является окислителем и одновременно сообщает красную окраску пламени.

§ 5. ВОЗМОЖНЫЕ ВЫСОКОЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

Любая химическая реакция протекает с разрывом связей между атомами и образованием других новых связей.

Очевидно, тепло будет выделяться в том случае, когда разрываемые связи будут слабыми, а вновь образуемые — более прочными.

Наиболее прочные связи образуются при соединении атомов элементов, противоположных по своим свойствам, т. е. типичных металлов с типичными неметаллами, например, фтором или кислородом. При взаимодействии их образуются ионные соединения. При соединении между собой неметаллов (элементов VA—VIIA групп периодической системы) имеем полярные соединения и большей частью энергетически малопрочные связи.

Фтор и кислород являются при обычных условиях газами, что исключает возможность их применения в пиротехнических изделиях. В качестве окислителей можно было бы использовать соединения, в которых кислород или фтор были бы слабо связаны с другими неметаллами. Однако большинство таких соединений являются или газами или низкокипящими жидкостями, как, например, ClF_3, OF_2, NF_3, N_2F_4, SF_6, Cl_2O_7, ClO_2, NO_2, N_2O_4 и др.

Это обстоятельство, а также токсичность и слишком большая химическая активность этих веществ в большинстве случаев препятствуют их практическому применению.

Этого в значительной степени можно избежать, если оксиды неметаллов (ангидриды) соединить с оксидами металлов, например, $Cl_2O_7+K_2O=2KClO_4$; $N_2O_5+K_2O=2KNO_3$ и т. п.

При этом образуются соли, по своим свойствам вполне пригодные для использования. Они менее химически активны, порошки их при обычной температуре могут быть смешиваемы с горючими, и смеси эти являются достаточно химически стойкими. Таковы обычно применяемые в пиротехнике окислители: перхлораты и нитраты щелочных (или щелочноземельных) металлов, например, $KClO_4$, KNO_3, $Ba(NO_3)_2$ и др. Они удобны для использования, но, конечно, значительно менее энергетически выгодны, чем элементарный кислород.

Другой тип окислителей — это оксиды малоактивных металлов. Реакции вытеснения их более активными металлами (стоящими выше в ряду напряжений) протекают с выделением значительного количества тепла. Такова, например, реакция горения железоалюминиевого термита:

$$Fe_2O_3+2Al=Al_2O_3+2Fe+205 \text{ ккал } (859 \text{ кДж}).$$

Аналогично можно было бы ожидать использования смесей, в которых более активный металл вытеснял бы менее активный из его фторидов. Но, кроме экономических соображений, применению в пиротехнике фторидов в качестве окислителей препятствует еще и то обстоятельство, что фтор (элемент чрезвычайно активный) редко образует твердые соединения с малопрочными связями [1].

В принципе было бы возможно использование в качестве окислителей таких оксидов металлов, как, например, Mn_2O_7,

[1] Исключением являются фториды ксенона: XeF_2, XeF_4, XeF_6 и XeF_8 [77].

CrO_3 и др., но свойства этих соединений не благоприятствуют их применению; Mn_2O_7 — это химически малоустойчивая жидкость, CrO_3 — хромовый ангидрид, сильно гигроскопичен.

Взаимодействие Mn_2O_7 или CrO_3 с оксидами металлов приводит к образованию приемлемых для практического применения солей, например:

$$CrO_3 + BaO = BaCrO_4;\ Mn_2O_7 + K_2O = 2KMnO_4.$$

Пероксиды металлов выгодны по бо́льшему (по сравнению с оксидами тех же металлов) содержанию в них кислорода, но многие из них малоустойчивы при нагревании (например, CaO_2) или по отношению к воде (например, Na_2O_2). Практически пока из пероксидов в пиротехнике используются только BaO_2 и в редких случаях — SrO_2 и надперекись — NaO_2.

Обратимся теперь к рассмотрению горючих. Кроме металлов, прочные связи с фтором и кислородом дает водород; достаточно прочные связи с кислородом образуют также бор, углерод, кремний, фосфор. Значит, эти простые вещества (элементы), а также некоторые их соединения (углеводороды, бороводороды и др.) могут быть использованы в пиротехнике в качестве горючих.

Но тут же невольно возникает вопрос: так как некоторые неметаллы (азот, хлор) дают с кислородом, а также с водородом и углеродом малопрочные связи, то почему же не объединить атомы этих элементов в молекулу таким образом, чтобы азот (или хлор) выполнял в ней роль буфера, отделяя С и Н от кислорода?

$$\underset{\text{(буфер)}}{\text{С и Н}|\text{N}|\text{О}}.$$

При внешнем энергичном воздействии на такую молекулу буфер будет выброшен, а при соединении С и Н с кислородом с образованием CO_2 и H_2O выделится большое количество тепла. Следовательно, весьма экзотермическими могут быть и реакции внутримолекулярного горения.

Эта мысль совершенно справедлива и давно реализована. Вещества, содержащие в молекуле между С и Н, с одной стороны, и О, с другой, буфер — азот (или хлор), давно известны: это нитросоединения или эфиры азотной (или хлорной) кислоты. Вещества эти способны к внутримолекулярному горению. Но у них имеется, с точки зрения пиротехника, один весьма существенный недостаток. Гомогенность системы, малое расстояние между атомами в молекуле приводит к тому, что при энергичном воздействии извне на вещество разрушение его может протекать с большой скоростью, в форме взрыва. Иначе говоря, это вещества взрывчатые (далее сокращенно ВВ).

Использование внутримолекулярного горения ВВ в пиротехнике возможно, но сопряжено во многих случаях со значитель-

ным риском: при нарушении режима горения может произойти переход горения во взрыв.

Вместе с тем между микрогетерогенными системами — пиротехническими составами, с одной стороны, и гомогенными системами — индивидуальными ВВ, с другой, возможна промежуточная ступень.

Если в молекуле какого-либо вещества, содержащего буфер — азот, будет *мало* атомов водорода и углерода и избыток (конечно, до известного предела) атомов кислорода, то такое вещество будет способно к реакции внутримолекулярного горения, но тепло такой реакции *невелико*, температура горения невысока, и вероятность перехода горения во взрыв будет значительно меньше.

Именно такими веществами являются, например, нитрат или перхлорат аммония. При горении этих веществ выделяется свободный кислород, а теплота и температура горения сравнительно невелики:

$$2NH_4ClO_4 = 4H_2O + N_2 + Cl_2 + 2O_2;$$

$$2NH_4NO_3 = 4H_2O + (1 - x)N_2 + (1 - x)O_2 + 2xNO.$$

Однако энергетику этих веществ легко повысить, добавив к ним некоторое (по расчету) количество горючего (можно использовать органическое связующее), чтобы целиком использовать избыточный кислород этих веществ. Если добавка горючего значительна и нарушает гомогенность системы, то опасность перехода горения во взрыв будет уменьшена.

Наряду с этим может быть реализован и другой вариант. Имеются вещества с буфером — азотом, содержащие *мало* атомов кислорода и избыток атомов С и Н. Такие вещества тоже будут способны к реакциям внутримолекулярного горения, но тепло и температура таких реакций будут *невелики*, а следовательно, будет мала и вероятность перехода горения во взрыв. К таким веществам могут быть отнесены нитрогуанидин $CN_4H_4O_2$, динитротолуол $C_7H_6N_2O_4$, полинитроуретаны, поливинилнитрат и др.

Энергетику этих веществ также легко повысить добавлением к ним некоторого количества окислителя (из числа веществ, не способных к экзотермическому процессу разложения). В этом случае происходит нарушение гомогенности и тем самым значительно уменьшается возможность возникновения взрыва.

§ 6. СПОСОБНОСТЬ К ГОРЕНИЮ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ И СМЕСЕЙ

В соответствии с принципом Бертло (он, безусловно, справедлив для высокоэкзотермических реакций, протекающих при комнатной температуре) всякая химическая система, для которой возможна экзотермическая реакция, при подборе соответствую-

щих внешних условий должна оказаться способной к распространению в ней процесса горения.

Для подтверждения этого положения автор книги провел ряд термохимических расчетов, а затем доказал экспериментально способность к горению некоторых индивидуальных веществ и двойных смесей.

К числу таких веществ относятся аммонийные соли многих кислот [98, 90], многие соли гидразина и гидроксиламина, комплексные соединения — амины нитратов металлов.

Также способными к горению оказались двойные смеси высококалорийных металлов (Mg, Al) с водой [29], карбонатами металлов, органическими соединениями, содержащими кислород (спиртами, углеводами и др.) [30].

В некоторых случаях термохимический расчет реакции имеет уже другой смысл — он производится с целью оценки пожароопасности (или взрывоопасности) системы. Так, например, установленная в 1957 г. в результате несчастного случая взрывоопасность перхлората серебра могла быть предсказана заранее на основании термохимического расчета:

$$AgClO_4 = AgCl + 2O_2 + 22 \text{ ккал } (92 \text{ кДж}).$$

Вещества или смеси, практически не способные к горению или взрыву при комнатной температуре, так как при разложении их выделяется слишком мало тепла, приобретают эту способность при повышении в них запаса энергии, т. е. в условиях повышенной температуры. Примером этому может служить грандиозный взрыв расплава хлората калия (Ливерпуль, 1899 г.). Добавка к хлорату калия малых количеств горючего (1% идитола+5% катализатора MnO_2) делает его способным к горению при комнатной температуре (при атмосферном давлении). Полезный материал по вопросу о неожиданных пожарах и взрывах имеется в статье [144].