

## **Предисловие**

Решение написать эту книгу пришло автору после общения с «широко известными в узких кругах» профессиональными пиротехниками. Дело в том, что на данный момент не существует русскоязычной книги, обобщающей все практические аспекты современной пиротехнической науки.

Существует некоторое количество узкоспециализированных изданий, описывающих какие-то отдельные направления пиротехники, но не предназначенных для охвата ситуации в целом. Поэтому пиротехникам приходится иметь большую библиотеку статей, книг, журналов и по крупицам добывать из них необходимую информацию.

Известная книга А.А. Шидловского «Основы пиротехники», изданная 40 лет назад, до сих пор является эталоном в русскоязычной пиротехнической литературе. Однако техника движется вперед, создаются новые составы и изделия, появляются недоступные ранее химикаты. К сожалению, прикладные вопросы и перечисленные рецептуры из 4-го издания уже на момент выхода «Основ пиротехники» утратили свою актуальность, и книга, подобная этой, была бы очень даже кстати.

Теория пиротехники была в полной мере рассмотрена ранее, например, в том же «Шидловском». Элементы теории, безусловно, присутствуют и в этой книге, но им уделено ровно столько внимания, сколько понадобилось для понимания чисто прикладных задач.

Слово «современная» в названии этой книги отнюдь не означает, что в ней рассказано только о новейших достижениях и разработках в пиротехнической области, а лишь подчеркивает связь нового с достижениями прошлого.

Следует подчеркнуть, что вся информация в этой книге взята только из открытой литературы с использованием комплексного ее анализа, и никакая режимная информация в данном издании не раскрывается.

При анализе патентной литературы автор старался учитывать перспективность изобретений и отсекал не практичные и трудно реализуемые идеи.

К большому сожалению, в связи с последними проявлениями экстремизма в мире, профессия или увлечение пиротехникой зачастую ассоциируется с терроризмом, взрывами, болью, страданиями ни в чем не повинных людей и т.д.

Данная книга также ставит целью развеять эти и многие другие устоявшиеся негативные стереотипы. Строго говоря, пиротехника не имеет прямого отношения к взрывчатым веществам и взрывным устройствам. Более полутора столетий назад пиротехника выделилась в самостоятельную научную область знаний, к настоящему времени имеющую совсем немного общего с взрывчатыми веществами и взрывными устройствами. Поэтому называть человека, изготавливающего взрывчатые вещества, пиротехником совершенно неправильно.

С помощью подавляющего большинства пиротехнических составов и устройств невозможно или, по крайней мере, бессмысленно изготавливать взрывные устройства для поражения живой силы. Конечно, пиротехнические изделия

могут стать причиной несчастных случаев и увечий, и статистика это подтверждает. Но, как правило, в этих несчастных случаях виноваты сами незадачливые граждане – пользователи пиротехники, легкомысленно пренебрегающие техникой безопасности. Нет сомнений, что российским гражданам необходимо прививать культуру обращения с пиротехническими изделиями, а ограничение доступа к качественной информации будет приводить только к увеличению количества несчастных случаев.

Распространено и другое мнение, когда под пиротехникой подразумевают лишь изготовление фейерверочных изделий, проведение салютов и всего, что с ними связано. Пиротехника на самом деле является наукой более широкого плана и включает в себя не только создание гражданских пиротехнических изделий, но и военных, а также затрагивает такие области, как создание новых материалов, средств пожаротушения, средств борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур и т.д.

Настоящая книга условно разделена на 2 части:

- в главах 1-3 даются базовые понятия, касающиеся пиротехники, представлен справочник по основным компонентам пиротехнических составов и отражены наиболее важные элементы теории;
- главы 4-20 носят прикладной справочный характер, описывают и классифицируют конкретные пиротехнические составы. В них приведено около 2000 пиротехнических композиций.

Автор выражает глубокую признательность Артему Свидинскому (старший научный сотрудник РФЯЦ ВНИИЭФ) и Александру Запапа (праздничное агентство «Праздник с огоньком») за плодотворную и конструктивную критику черновика этой книги, в результате чего первая рукопись была заново переработана.

Автор благодарит Кузнецова Андрея Владимировича за финансовую и организационную поддержку издания этой книги, администрацию Интернет-ресурса [www.pirotehnika-ruhelp.com](http://www.pirotehnika-ruhelp.com) за информационную поддержку, а также ряд других пиротехников и специалистов правоохранительных структур за их вклад в создание этой книги.

# **Глава 1. Базовые сведения о пиротехнике и пиротехнических составах**

## **1.1. Пиротехника и пиротехнические составы. Основные положения**

Слово «пиротехника» произошло от греческого «пирос» – огонь и «техне» – искусство. Пиротехника – это наука о свойствах пиротехнических составов, изделий из них, способах их изготовления и применения. При первом знакомстве с этой наукой создается впечатление, что пиротехника играет некоторую вспомогательную роль, обеспечивающую нормальное функционирование боеприпасов, ракет и т.п. изделий. Тем не менее она имеет и самостоятельное значение, например, в создании новых материалов, средств пожаротушения, фейерверков и т.д.

В общепризнанной литературе, где авторы специализируются на исследовании взрывчатых веществ (ВВ), пороха, твердые ракетные топлива и пиротехнические составы рассматриваются как особая разновидность взрывчатых веществ. Различие между ними строится по способности перехода горения в детонацию [1, 2], тогда как в литературе по военной пиротехнике пиротехнические составы выделены в самостоятельный класс смесей, к которым причисляются и твердые ракетные топлива [3]. Такая путаница связана с тем, что все указанные смеси могут как устойчиво сгорать, так и взрываться, в зависимости от отдельно взятых композиций, а также приведенных к ним воздействий.

Например, уже более 30 лет в странах НАТО используются так называемые «малочувствительные взрывчатые вещества», горение которых так же трудно переходит в детонацию, как и горение порохов. Большинство же пиротехнических составов вообще не способно к взрывному разложению в том виде, в котором они используются в изделиях.

Это обстоятельство привело к возникновению в 70-х годах новой классификации, где различие между указанными типами веществ лежит в областях применения, а не в способности перехода горения во взрыв.

Старая классификация все же сохранилась в некоторых сферах деятельности, например в криминалистике и в классификации опасных грузов, т.е. там, где определяющим фактором является способность вещества взрываться.

Итак, в современной специализированной литературе [4, 5] для большей ясности пиротехнические составы относят к так называемым энергонасыщенным материалам (ЭМ, энергетическим конденсированным системам) – индивидуальным веществам или смесям, способным разлагаться в самостоятельно поддерживаемом режиме с выделением значительного количества тепла.

**Все энергонасыщенные материалы разделяют на 5 основных типов:**

- **инициирующие взрывчатые вещества;**
- **бризантные взрывчатые вещества;**
- **пороха и твердые ракетные топлива;**
- **пиротехнические составы;**
- **специальные топлива.**

**Иницирующими взрывчатыми веществами (ИВВ)** называют вещества, которые легко детонируют или воспламеняются при ударе, трении или действии луча огня. Соответственно ИВВ применяются для иницирования детонации в зарядах более стабильных бризантных взрывчатых веществ либо в смесях для первичного воспламенения порохов, твердого ракетного топлива и пиротехнических составов.

***Примечание.***

*Детонация – это взрывчатое превращение, распространяющееся со скоростями 1,5-9,5 км/сек. В отличие от горения, механизм ее передачи не тепловой, а ударно-волновой.*

**Бризантными взрывчатыми веществами (БВВ)** называют индивидуальные вещества или смеси, в которых сравнительно трудно возбудить детонацию простейшими воздействиями типа удара или луча огня. Однако при действии детонационной волны, вызванном взрывом ИВВ, они устойчиво детонируют. При расширении сжатых продуктов детонации происходит взрыв. БВВ применяются в боеприпасах и при взрывных работах.

**Порохами и твердыми ракетными топливами** называют смеси веществ, способные к устойчивому горению в самом широком диапазоне давлений и условий, в которых обычные иницирующие и бризантные взрывчатые вещества будут сгорать неустойчиво или взрываться. Горение порохов в определенных условиях может переходить во взрыв, однако этот режим является совершенно недопустимым для их обычного применения. Поэтому составы порохов и конструкцию пороховых зарядов подбирают так, чтобы вероятность перехода горения во взрыв была сведена к минимуму. При сгорании порохов выделяются разогретые газы, которые совершают работу, т.е. сообщают боеприпасам (снарядам и ракетам) необходимую скорость полета к цели, поэтому их иногда называют метательными взрывчатыми веществами.

**Пиротехническими составами** называют смеси, сжигание которых направлено на достижение тепловых, световых, дымовых, реактивных и звуковых пиротехнических эффектов [3]. Успех создания требуемого эффекта зависит не только от пиротехнического состава, но и от конструкции изделия, в котором этот состав применяется. Однако если конструкции пиротехнических изделий принципиально не меняются на протяжении нескольких десятков лет, то пиротехнические составы претерпевают постоянную эволюцию. Пиротехнические составы представляют собой механическую смесь окислителя и горючего, а также небольшого количества вспомогательных компонентов. Об этих составах в данной книге и пойдет речь, хотя по мере необходимости будут затрагиваться некоторые аспекты, связанные с взрывчатыми веществами и порохами. Некоторые разновидности порохов широко используются в пиротехнике, как в самостоятельном виде, так и в модифицированном. Как и порох, пиротехнические составы ориентированы на стабильное горение с минимальной вероятностью перехода горения во взрыв.

Тем не менее для имитации разрывов боеприпасов существуют специальные пиротехнические средства, в которых взрыв является штатным режимом горения. Взрывы таких пиротехнических средств предназначены только для визуальной и акустической имитации действия штатных боеприпасов и сопровождаются пониженным разрушительным действием (если они не содержат штатных ВВ) [10]. Свойства пиротехнических составов и других типов энергонасыщенных материалов могут быть охарактеризованы при помощи таблицы 1.1 [6, 7].

**Специальные топлива** – твердые или жидкие вещества, способные сгорать за счет внешнего подвода окислителя. Следует сразу оговориться, что в данном случае под топливом подразумеваются искусственно изготовленные смеси и материалы, используемые для снаряжения жидкостных ракет, прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД), изготовления топливных брикетов и т.п. объектов. Термин «специальные» показывает некоторое смысловое отличие от «традиционных» видов топлив типа мазута, керосина или дизельного топлива. В силу специфики разработки, производства и схожести процессов горения с горением пиротехнических смесей, многие специальные топлива часто рассматриваются как пиротехнические составы, что нашло отражение в данной книге.

**Табл. 1.1. Свойства энергонасыщенных материалов**

Типы энергонасыщенных материалов	Теплота сгорания, Дж/г	Газообразные продукты, мл/г	Дробящий эффект, г*	Температура вспышки, °С	Восприимч. к удару, см. (груз 2 кг)
<b>Пиротехнические составы:</b>					
замедлительный состав 1	2010	13	0	650	-
замедлительный состав 2	2080	12	0	485	56
осветительный состав	6100	74	8	640	60
дымовой состав	2580	62	8	475	23
фотоосветительный состав	8990	15	7	700	100
<b>Иницирующие ВВ (ИВВ):</b>					
гремучая ртуть	1790	315	24	180	5
азид свинца	1550	308	15	300	10
<b>Бризантные ВВ (БВВ):</b>					
тротил	4190	730	48	475	100
гексоген	5450	908	60	260	32
<b>Пороха (Метательные ВВ):</b>					
дымный порох	2900	272	8	288	50
пироксилиновый порох	3350	900	-	180-200	60-80
баллиститный порох	5100	850	-	180-200	70-90
смесевое ракетное топливо	6700	600	-	до 300	40-90
<b>Специальные топлива:</b>					
гидрореагирующее топливо	12000**	2000**	-	-	-
топливо для ПВРД	33000**	-	-	-	-

\* – бризантность по песочной пробе;

\*\* – пусть читателя не вводят в заблуждение более высокие цифры, по сравнению с предыдущими типами ЭМ. Для сгорания специальных видов топлива необходим внешний подвод окислителя, тогда как другие типы ЭМ содержат окислительные элементы в своем составе.

Классифицировать разновидности пиротехнических составов можно следующим образом [8, 9]:

**Табл. 1.2. Классификация пиротехнических составов**

Эффект	Тип составов
тепловой	составы первичного воспламенения (ударные, накольные, терочные, электровоспламенительные), воспламенительные составы, замедлительные и зажигательные составы, реакционные материалы, теплогенерирующие смеси, составы для резки и сварки металлов
образование газов и синтез материалов	системы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), газогенерирующие составы
образование дыма (аэрозоля)	дымовые маскирующие, дымовые сигнальные, аэрозольгенерирующие составы
световой	осветительные, инфракрасные, сигнальные, трассирующие, фейерверочные
звуковой	звуковые, светозвуковые, свистящие и имитационные составы

Безусловно, такая классификация носит формальный характер, указывающий лишь на основную область применения данного состава, потому что сгорание любой пиротехнической смеси сопровождается сразу несколькими эффектами, из которых выделяется один или два доминирующих.

Для начального представления о многообразии пиротехнических смесей следует привести их краткое описание.

#### **Составы для создания теплового эффекта**

- *Ударные, накольные, терочные и электровоспламенительные составы* – служат для первичного воспламенения пиротехнических смесей, порохов, ВВ, инициируемого механическим воздействием (ударом или трением) либо первичным нагревом, вызванным подачей электрического тока. Ударные и накольные композиции обычно содержат инициирующие взрывчатые вещества и очень чувствительны к удару. Иногда их даже называют смесевыми инициирующими взрывчатыми веществами. Терочные композиции близки к составам намазок для спичечных головок, воспламеняются за счет трения между специальной теркой и самим составом. Электровоспламенительные составы являются разновидностью самых теплочувствительных воспламенительных смесей.
- *Воспламенительные составы* – служат для воспламенения всех остальных пиротехнических составов. Их необходимость существования связана с тем, что многие пиротехнические составы не способны надежно воспламениться от таких первичных источников огня, как капсюль-воспламенитель, огнепроводный шнур, спички и т.д.
- *Замедлительные составы* – смеси для снаряжения пиротехнических устройств, обеспечивающих заданную временную задержку взрыва, срабатывания пиропатронов, ракетных двигателей и т.п. Простейшими такими устройствами можно считать огнепроводный шнур и запалы для гранат. Их

особенностью является способность сохранять постоянную скорость горения независимо от внешних условий.

- *Зажигательные* – составы, служащие для создания очагов пожаров как поражающего фактора. Интересно отметить, что по статистике Второй мировой войны, их массовая эффективность как средства поражения материальных объектов превосходила эффективность обычных боеприпасов, снаряженных взрывчатыми веществами, приблизительно в 5 раз. К примеру, расход зажигательных боеприпасов, примененных союзниками во время войны против Германии, был эквивалентен расходу обычных боеприпасов, а 99% всех авиабомб, сброшенных США на японские города, были зажигательными [6].
- *Реакционные материалы* – конструкционные материалы, обладающие свойствами пиротехнических смесей. Из них изготавливают конструктивные элементы боеприпасов с целью усиления их поражающего действия, выражающегося в повышении заброневоего эффекта. Этот эффект, как правило, носит зажигательный, реже – фугасный или термобарический характер.
- *Теплогенерирующие составы* – смеси, сгорание которых направлено на выделение строго дозированного количества тепла. Применяются в термических активаторах специальных электрических батарей, приводимых в действие повышением температуры, для полевого разогрева пищи и т.д. К ним также относят термитные составы для резки и сварки металлов – композиции, сгорающие с выделением большого количества тепла и применяемые для сварки и резки материалов в сложных условиях, например при ремонте рельсов и электрических проводов.

### **Составы для образования газов и синтеза материалов**

- *Системы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС)* – специальные пиротехнические смеси для получения особо твердых и тугоплавких материалов (например, карбида титана), образующихся в процессе сгорания. Метод СВС характеризуется очень простой технологией, малым временем синтеза и не требует сложного и дорогостоящего оборудования, используемого при традиционном получении таких материалов путем спекания.
- *Газогенерирующие составы (ГГС)* – смеси с регламентированным газовыделением, предназначенные для наддува различных средств типа автомобильных подушек безопасности, спасательных жилетов и т.п., выталкивания пиротехнических элементов (вышибные составы), для снаряжения различных пиромеханических устройств, в качестве твердого ракетного топлива для пиротехнических и модельных ракет. Ряд газогенерирующих составов используют в качестве специальных топлив для раскрутки турбин, образования активной среды для лазеров, низкотемпературной плазмы и т.д. Газогенерирующие составы имеют много общего с порохами и ракетными топливами, более того, для этих целей часто используют штатные или модифицированные бездымные, а также дымные пороха.



К газогенерирующим составам также относят смеси, при сгорании которых выделяется какой-то определенный газ для технических нужд, например кислород, используемый для дыхания на подводных лодках, космических кораблях и т.д.

### **Дымовые и аэрозольгенерирующие составы**

- *Дымовые маскирующие* – составы для создания дымовых завес с целью сокрытия действий войск в боевой обстановке, для противодействия управляемому и высокоточному оружию, для ослепления войск противника.
- *Дымовые сигнальные* – составы цветного дыма для подачи сигналов днем, указания местоположения боевых точек противника, проведения дневных пиротехнических шоу и т.д.
- *Аэрозольгенерирующие* – составы, предназначенные для приведения в аэрозольное состояние ядохимикатов в целях борьбы с вредными насекомыми и грибами. Раздражающие составы переводят в аэрозоль раздражающие и слезоточивые вещества для разгона демонстраций или затруднения действий войск противника. Пиротехнические смеси для воздействия на погодные условия выделяют при своем сгорании аэрозоль, активно взаимодействующий с верхними слоями атмосферы и вызывающий выпадение осадков. Аэрозольгенерирующие составы для тушения пожаров – смеси, выделяющие при своем сгорании негорючие газы и аэрозоль, способный подавлять очаги пожара за счет блокировки цепных реакций в пламени. Используются в автоматических средствах пожаротушения.

### **Составы для создания световых эффектов**

- *Осветительные* – составы для более или менее кратковременного освещения участков местности в тех условиях, когда освещение обычными средствами не представляется возможным, например, в условиях ночных боевых действий.
- *Инфракрасного (ИК) излучения* – составы, основное излучение которых приходится на ИК-область спектра при сравнительно низкой интенсивности излучения в видимом спектре. Используются совместно с ИК средствами наблюдения при ведении ночных боевых действий, а также для создания ложных тепловых целей при противодействии управляемому и высокоточному оружию с ИК-системами наведения.
- *Сигнальные* – составы, сгорающие ярким окрашенным пламенем и используемые для подачи визуальных сигналов в военном деле, на транспорте и при спасательных операциях.
- *Трассирующие* – составы, сгорающие ярким окрашенным пламенем, предназначенные для визуального наблюдения и корректировки траектории полета снарядов, пуль и ракет. Их запрессовывают в донную часть боеприпаса, и при сгорании они образуют яркую трассу. Существуют также ИК трассирующие составы, предназначенные для использования совместно с ИК средствами наблюдения.



- *Фейерверочные* – составы, предназначенные для создания красочных визуальных и акустических эффектов при проведении салютов и фейерверков.

### **Составы для создания звуковых эффектов**

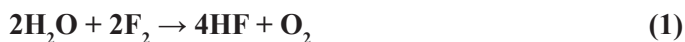
- *Звуковые, светозвуковые и имитационные составы* – пиротехнические смеси, сгорающие с очень высокой скоростью, но в отличие от взрывчатых веществ их взрывчатое превращение происходит в режиме быстрого горения, а не детонации, поэтому разрушительный эффект у подобных смесей значительно ниже. Разрыв пиротехнического изделия, начиненного таким составом, сопровождается вспышкой, громким звуком и образованием дыма. Имитируют разрывы боеприпасов на военных учениях и используются для создания светозвуковых эффектов. Кроме того, подобные смеси также используются в гражданских пиротехнических изделиях для создания эффектов треска и разрыва (петарды), а также для создания пиротехнических эффектов в кино.
- *Свистящие составы* – смеси, горение которых в трубчатых корпусах сопровождается громким свистом. Используются как для имитации полета снарядов и психологического воздействия на противника, так и в фейерверочных шоу.

## **1.2. Горение и воспламенение пиротехнических составов**

Все пиротехнические эффекты являются следствием процесса горения.

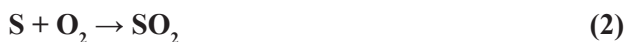
Эффекты, создаваемые при помощи пиротехнических изделий можно получить другими техническими и химическими способами. Так, например, освещение местности можно осуществить при помощи мощных прожекторов, создание аэрозолей возможно при помощи специальных распылительных машин, акустические эффекты треска легко создаются пневматическими устройствами. Однако все эти способы, как правило, лишены одновременного сочетания таких свойств, как автономность, простота в эксплуатации, надежность и сравнительно небольшие габариты, присущие пиротехническим изделиям.

Как было сказано ранее, пиротехнические смеси состоят из окислителя и горючего. Вообще, у людей, мало знакомых с химией, бытует мнение, что без кислорода горение невозможно. Кислород является одним из самых сильных окислителей и поэтому поддерживает горение. Но в действительности окислителями могут быть и другие элементы, как-то: фтор, сера, селен, их соединения и др. Например, известен такой факт, что струя воды в атмосфере фтора способна сгорать пламенем синего цвета с выделением кислорода. И если реакция горения – это не что иное, как окислительно-восстановительная реакция, то ее можно записать как обычное химическое уравнение:



Фтор является более активным окислителем, чем кислород, и по отношению к нему вода уже является горючим (восстановителем).

Аналогичный пример – горение серы в кислороде:



Кислород является более активным окислителем, чем сера, и по отношению к кислороду сера является восстановителем (горючим). В пиротехнике сера обычно применяется в качестве горючего компонента.

Однако активные металлы, например алюминий, способны энергично сгорать в смеси с серой:



По отношению к алюминию сера является окислителем.

В нормальном состоянии кислород – это газ. Обычно в пиротехнике используются твердые окислители, содержащие кислород в связанном состоянии и высвобождающие его при нагревании. Такими окислителями могут быть соли азотной и хлорной кислот, оксиды малоактивных металлов, неорганические пероксиды и т.д. Например, при нагревании типичного окислителя – бертолетовой соли – кислород выделяется по схеме:



Горючие в пиротехнике отличаются от горючих, с которыми мы привыкли иметь дело в быту. Например, на воздухе порошок железа можно только лишь раскалить, тогда как в смеси с окислителем типа перхлората калия порошок железа активно сгорает. Свойства многих горючих компонентов могут кардинально изменяться в зависимости от того, насколько сильно они измельчены и насколько тесен их контакт с окислителем. Например, компактный цирконий чрезвычайно устойчив к окислению, из него даже изготавливают электроды для плазмотронов, устойчивые к окислительной среде. Однако тонкие порошки циркония могут самовоспламеняться на воздухе, поэтому их хранят в воде. Мелкодисперсные порошки металлов, склонные к самопроизвольному воспламенению на воздухе называют пирофорными. Пирофорность характерна даже для таких малоактивных в обычном состоянии металлов, как свинец.

В некоторых веществах горючие и окислительные элементы находятся в одной молекуле (нитроцеллюлоза, нитрат гуанидина и т.д.). Как правило, такие вещества в определенных условиях обладают взрывчатыми свойствами.

Горение типичного представителя пиротехнических горючих – сажи – в кислороде можно записать как:



Чтобы запустить реакцию между окислителем и горючим, нужно создать определенные условия для поддержания устойчивого горения. Очевидно, что соотношение между окислителем и горючим и их степень измельчения будут одними из основных факторов, определяющих способность смеси к горению. Если окислителя или горючего будет слишком много, то выделяющееся тепло будет тратиться на его разложение и смесь станет не способной к горению. С точки зрения максимального энерговыделения обычно оптимальным является соотношение компонентов, в котором горючие компоненты будут полностью окислены кислородом

окислителя. Это соотношение называется стехиометрическим. Например, для пиротехнической смеси бертолетовой соли и сажи стехиометрическое уравнение сгорания можно записать, комбинируя реакцию 4 и 5:



Соответственно, из простейших расчетов школьного уровня химии можно определить требуемое соотношение компонентов:  $2 \cdot 122,5 : 3 \cdot 12$  ( $M(\text{KClO}_3) = 122,5$  г/моль,  $M(\text{C}) = 12$  г/моль). Из чего оптимальное соотношение с точки зрения максимального энерговыделения будет соответствовать 87,2% хлората калия и 12,8% сажи.

### **Примечание.**

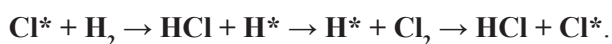
*Не всегда достижению максимальной температуры соответствует максимальное энерговыделение и стехиометрическое соотношение компонентов. Например, для газовой резки тугоплавких материалов иногда используют смесь дициана  $\text{C}_2\text{N}_2$  с кислородом. Температура горения дициана с кислородом, взятых в стехиометрическом соотношении, равна  $3500^\circ\text{C}$ . Если же баланс рассчитан на недостаток кислорода (вместо  $\text{CO}_2$  образуется  $\text{CO}$ ), то температура горения достигает  $4800^\circ\text{C}$ . Такая разница объясняется тем фактом, что при высоких температурах (на практике выше  $3000^\circ\text{C}$ ) резко увеличиваются потери на диссоциацию молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .*

Для устойчивого режима горения необходимо поддержание в зоне реакции определенной температуры, в противном случае время реакции резко увеличивается, а интенсивный теплообмен зоны реакции с окружающей средой ведет к дальнейшему охлаждению и затуханию. Конкуренция между теплоотводом и химическим энерговыделением приводит к существованию минимального количества состава, которое нужно «подогреть», чтобы процесс стал самоподдерживающимся, и, соответственно, минимальной энергии, необходимой для этого разогрева. Эту энергию можно обозначить как «энергия инициирования». Величина энергии инициирования зависит от состава пиротехнической смеси, она является неким «потенциальным барьером», ниже которого горение затухает. «Борьба» с тепловыми потерями приводит к тому, что для устойчивого горения энергосодержание состава должно в несколько раз превосходить тепло, требуемое для нагрева до температуры воспламенения.

Поглощение энергии окружающей средой определяется масштабным фактором, т.е. зависит от линейных размеров горячей зоны. Существованию масштабного фактора пиротехнические составы обязаны, например, прекращению горения смеси, если диаметр заряда сгорающей композиции становится меньше определенной величины. В этом случае доля энергии, поглощаемой окружающей средой (воздухом или стенками трубки, куда запрессован состав), становится настолько большой, что выделяющегося тепла уже недостаточно для поддержания самораспространяющегося процесса. Противоположным эффектом является свободный переход горения в тепловой взрыв, когда при больших диаметрах заряда концен-

трация энергии становится настолько значительной, что спокойное горение переходит в более быстрый, конвективный процесс, а при дальнейшем увеличении диаметра – даже во взрыв. Безусловно, все эти процессы имеют ту или иную зависимость от размеров частиц в смеси, ее плотности, начальной температуры и т.п. условий.

Начальный процесс, когда при подводе энергии извне пиротехническая смесь начинает сгорать в самоподдерживающемся режиме, называют воспламенением. Эта энергия не обязательно должна подводиться в виде тепла, хотя при классическом воспламенении пиротехники это, как правило, тепло или луч огня. Так, например, смесь газа хлора с водородом при смешивании в темноте может храниться в неизменном виде довольно долго. Но стоит на эту смесь воздействовать вспышкой от обычного фотоаппарата, как незамедлительно происходит взрыв. Это объясняется переходом отдельных молекул хлора под воздействием кванта света в активное атомарное состояние:  $\text{Cl}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{Cl}^*$ , которое инициирует химические превращения по цепному механизму:



Процесс воспламенения некоторых конденсированных веществ по цепному механизму тоже представляет собой запуск промежуточных реакций, только на порядки более сложных и короткоживущих. Схожесть его с вышеописанным взрывом хлороводородной смеси заключается в возникновении активных частиц, возбужденных атомов и радикалов, инициирующих дальнейшую цепь химических превращений. На появление этих активных частиц в количестве, достаточном для возникновения самоподдерживающегося процесса, как раз и уходит энергия инициирования.

Сильная зависимость скорости реакции от температуры и значительный тепловой эффект горения многих пиротехнических составов приводит к прогрессивному накоплению тепла в случае нагревания всего объема навески материала. Если тепловыделение больше теплоотвода, то температура навески состава быстро повышается и происходит самовоспламенение (вспышка или тепловой взрыв). Такой механизм воспламенения наиболее изучен и носит название «теплого воспламенения». В первом приближении тепловое воспламенение при равномерном распределении температуры в объеме навески описывается теорией Н.Н. Семенова. Если теплообмен осуществляется лишь посредством теплопроводности, критическое условие самовоспламенения описывается критерием Франк-Каменецкого. Краткое описание выдержек из теории воспламенения приведено в [35] (статья В.В. Барзыкина «Воспламенение»).

Некоторые вещества способны воспламеняться уже при смешивании, например, достаточно поместить каплю глицерина на небольшую навеску перманганата калия, как через несколько секунд произойдет самовоспламенение. Если же вместо глицерина взять диметилсульфоксид (ДМСО), то вспышка происходит почти мгновенно. Склонность к самовоспламенению объясняется тем, что энергия инициирования смеси настолько мала, что обычной температуры уже достаточно для самопроизвольного воспламенения этой композиции. Способность к самовоспла-

менению некоторых веществ или смесей иногда используется на практике. Например, для инициирования воспламенения состава в американском светодымящем бое применяют композицию из 51,2% перекиси натрия, 32,3% ферросилиция и 16,1% алюминия, самовоспламеняющуюся при контакте с водой [6]. Раньше были широко распространены химические воспламенители и замедлительные устройства, основанные на реакции между серной кислотой и смесью сахара с бертолетовой солью.

В реальных изделиях воспламенение осуществляют не прогревом всей массы заряда пиротехнического состава (т.к. это неизбежно привело бы к тепловому взрыву), а воздействием высокотемпературного источника на какую-либо поверхность заряда. В результате чего происходит сначала прогрев этой поверхности на определенную толщину, а затем «срыв температуры», т.е. прогрессивный саморазогрев прогретого слоя. Этот процесс называется «зажиганием», а распространение горящего фронта перпендикулярно поверхности воспламенения – послойным горением.

В широком смысле **горение** – это физико-химический процесс, сопровождающийся интенсивным выделением энергии, а также тепло- и массообменом с окружающей средой. И чтобы запустить этот процесс, нужно определенное сочетание факторов.

Под это определение подпадают и другие процессы – **детонация** и **дефлаграция** (взрывное горение). Различия между ними видны из таблицы 1.3 [34].

**Табл. 1.3. Различия между процессами горения, дефлаграции и детонации энергонасыщенных материалов**

Параметры	Горение	Дефлаграция	Детонация
скорость распространения, м/сек	$10^{-3} - 10$	10 - 2000	1500 - 9500
скорость относительно скорости звука в веществе	значительно ниже	ниже или выше	выше
время реакции, сек.	$1 - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-4}$	$10^{-6} - 10^{-9}$
температура реакции, °С	300 - 3500	1500 - 4000	2000 - 4000
давление при реакции, атм.	$0 - 5 \cdot 10^3$	$1(10) - 10^4$	$10^4 - 5 \cdot 10^5$
механизм распространения	теплопередача, диффузия	теплопередача, диффузия, конвекция	ударно-волновой

- *Горение* – процесс теплового превращения, в котором передача тепла и распространение реакции осуществляется послойно, от слоя прореагировавшего вещества к непрореагировавшему. Примером послойного горения является сгорание малопористых зарядов твердых ракетных топлив, спрессованных таблеток пиротехнических составов, горение спичечной головки и т.д. Послойно гореть могут и бризантные взрывчатые вещества. Верхний предел температур в процессах горения определяется энерговыделением состава и свойствами продуктов реакций. При 2000-3000°С идет разложение и испарение конденсированных и диссоциация газообразных продуктов, на что затрачивается значительная доля энергии реакции, поэтому наиболее высо-

кие температуры получаются для составов, при горении которых образуются термостабильные продукты. Рост давления подавляет испарение и диссоциацию, что приводит к повышению температуры. Нижний предел температур при горении обусловлен скоростью процесса и потерями на теплопроводность. Для устойчивости процесса температура горения должна превышать температуру воспламенения (обычно не менее чем в 1,5-2 раза). На практике порог воспламенения, при котором состав может храниться, составляет  $\sim 120^\circ\text{C}$ ; отсюда получается, что температура горения не может быть ниже  $\sim 300^\circ\text{C}$ . Существуют самораспространяющиеся реакции с температурой воспламенения порядка  $50-100^\circ\text{C}$  и развивающие температуру  $\sim 200^\circ\text{C}$ , однако такие составы не могут храниться долго и склонны к самовоспламенению. Пример – некогда популярная у школьников смесь анальгина с гидроперитом. Для некоторых составов может существовать нижний порог давления, ниже которого они не горят, другие стабильно горят в условиях вакуума. Верхний порог  $10000\text{ атм}$  – величина условная, связанная с невозможностью обеспечить на практике более прочную оболочку ( $5000-10000\text{ атм}$  – предел текучести большинства марок стали). Для многих составов послышное горение уже при значительно меньших давлениях переходит в дефлаграцию.

- *Детонация* – штатный режим взрывного превращения бризантных взрывчатых веществ, протекающий со скоростями выше скорости звука в данном веществе. В установившемся режиме детонации вещество инициируется ударной волной, а высокая скорость реакции с выделением газов и энергии эту волну подпитывает. Скорость ударной волны выше скорости звука, что обеспечивает независимость параметров детонации от окружающей среды (возмущения попросту не успевают ее «догнать»). Для поддержания детонации требуется высокий уровень давления, который можно оценить как  $P = \rho \cdot D^2 / (\gamma + 1)$ , где  $\rho$  – плотность,  $D$  – скорость детонации,  $\gamma$  – показатель адиабаты, равный для конденсированных веществ  $\sim 3$ .

Поскольку за фронтом детонационной волны давление быстро спадает, для ее поддержания требуется чрезвычайно высокая скорость реакции, а это, в свою очередь, выдвигает требование к температуре – ниже  $1500-2000^\circ\text{C}$  время реакции становится слишком велико. Например, при времени  $10\text{ мкс}$  диаметр заряда должен составлять уже сотни мм. В то же время высокое давление подавляет процессы испарения и диссоциации продуктов взрыва, поэтому развиваемая при детонации температура заметно выше, чем при горении и дефлаграции тех же составов. Для большинства промышленных и многих ВВ военного назначения реакция может идти в несколько стадий, в этом случае параметры детонации определяются самой быстрой, а более медленные стадии слабо на нее влияют. Такой режим называют «неидеальной» детонацией, а для смесевых ВВ, когда быстро реагирует только один из компонентов, – «селективной». При высокой доле медленных реакций детонация приобретает черты дефлаграции.



- *Дефлаграция* – процесс распространения взрывного превращения за счет конвективного горения. При этом нагретые продукты сгорания проникают в несгоревшее вещество, обеспечивая высокую скорость фронта горения. Величина давления газообразных продуктов реакции, необходимого для такого режима, определяется прочностью и структурой состава – чем ниже пористость и больше прочность, тем труднее создать условия для дефлаграции. После возникновения таких условий реакция идет с разгоном и для некоторых составов может перейти в детонацию. Максимальное давление обычно определяется прочностью оболочки, и в отличие от детонации, дефлаграция не способна передаваться через слой вещества, разделенный тонкой прочной перегородкой. Время реакции ограничено оттоком газов из оболочки и может быть значительно выше, чем при детонации. Примером дефлаграции является горение пористых и дисперсных систем в закрытом объеме – например, пороховой мякоти в картонной гильзе, светозвукового пиротехнического состава, взрывы в шпурах некоторых промышленных ВВ, переход горения в детонацию в капсулах-детонаторах. В некоторых случаях дефлаграция после стадии разгона выходит на высокую, но постоянную скорость, при этом трудно провести границу между дефлаграцией и быстрым горением. Иногда процесс является одновременно и дефлаграцией, и послойным горением, например, сгорание пороха при выстреле. Распространение продуктов сгорания между гранул пороха является дефлаграцией, а горение самих гранул носит послойный характер.

Таким образом, в зависимости от условий (оболочки, плотности, дисперсности), горение некоторых энергонасыщенных материалов может переходить в дефлаграцию, а при благоприятных условиях – в детонацию. Для одних типов материалов этот переход осуществляется легче, для других – труднее, для некоторых он невозможен в принципе.

Большинство пиротехнических составов в штатном режиме детонировать не способны, но для некоторых композиций, при изменении условий, детонация возможна. Например, газогенерирующий состав на основе нитрата аммония в виде монолитного заряда не чувствителен к детонации, однако в тонко измельченном и слабоуплотненном состоянии превращается в ВВ. Дымный порох в виде сильно спрессованной шашки спокойно сгорает в модельных ракетных двигателях, тогда как в виде порошка (пороховой мякоти) дефлагрирует с громким звуком и разрывом корпуса.