

APPLICATIONS
OF ENERGETIC
MATERIALS
IN ENGINEERING,
TECHNOLOGY AND
NATIONAL ECONOMY

I. V. TSELINSKII

The main regions of application of energetic materials (i.e., propellants and explosives) for civil purposes are reviewed, with an emphasis on their use in modern technologies and engineering. Special attention is drawn to the problems of application of energetic materials in oil and gas prospecting and output, in space technologies, machine construction, for the synthesis of novel and superhard materials.

Рассмотрены основные направления использования высокогенергетических веществ и материалов (порохов и взрывчатых веществ) в мирных целях, в основном в современной технике и технологиях. Особое внимание уделено проблемам применения высокогенергетических материалов при разведке и добыче нефти и газа, в космической технике, в машиностроении, при получении новых и сверхтвердых материалов.

© Целинский И.В., 1997

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНИКЕ И НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

И. В. ЦЕЛИНСКИЙ

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Использование достижений химии и технологии высокогенеретических материалов в различных областях техники и народном хозяйстве позволяет не только резко повысить эффективность и экономичность многих технологий, но и создавать принципиально новые материалы, изделия и технологические процессы. Особенно широко такие исследования и разработки развернулись в последние годы в связи с конверсией оборонных предприятий и военной техники.

Поскольку пороха и взрывчатые вещества (ВВ) являются чрезвычайно компактными носителями энергии, не требующими для ее реализации сложных устройств, они давно используются для производства трудоемких работ, таких, как строительство дорог, дамб, плотин, прокладка туннелей, каналов, добыча полезных ископаемых. В самом деле, 200 г аммонита (ВВ на основе нитрата аммония), взрывааясь со скоростью 5 км/с, развивают мощность, равную 21,5 млн л.с., в мгновенный отрезок времени, равный $5 \cdot 10^{-5}$ с; 400 г тротила при взрыве в течение $9 \cdot 10^{-5}$ с производят работу, эквивалентную одновременному усилию более миллиарда человек. Если не считать атомную энергию, то ни одна машина не в состоянии при равных массе и размерах развивать такую титаническую мощность. Недаром изобретение пороха, а затем и взрывчатых веществ считается одним из величайших достижений человечества.

В горном деле пороха стали применять еще в XVII веке, однако широкое использование высокогенеретических материалов для добычи полезных ископаемых началось только с появлением динамиита (ВВ на основе тринитрата глицерина, смешанного с твердым наполнителем, таким, как карбонат магния или инфузорная земля), около 130 лет тому назад. В течение длительного времени горнодобывающая промышленность была практически единственным объектом мирного использования ВВ, и даже сейчас она является потребителем 80–90% всех промышленных ВВ. Без применения ВВ горные разработки практически невозможны. В частности, 3/4 всего угля добывается с помощью взрыва.

Техника взрывных работ при добыче полезных ископаемых относительно проста. В залежи руды

или пласте угля пробуривают узкие наклонные, горизонтальные или вертикальные скважины (шпуры) длиной до 5 м. Заряд ВВ закладывают или заливают внутрь шпура, вставляют детонирующее устройство и производят взрыв. Так как условия взрыва могут быть весьма различными из-за вариации плотности залежей, степени насыщения их водой, необходимости получения кусков или блоков породы определенных размеров, то удовлетворить все эти требования с помощью лишь одного типа ВВ невозможно.

Например, при добыче декоративного камня, используемого при изготовлении памятников, художественных изделий, в облицовочных работах, обычные ВВ неприменимы из-за высокого бризантного (дробящего) действия. Поэтому до последнего времени в этих целях использовали дымный (черный) порох, при горении которого в замкнутом объеме давление нарастает значительно медленнее, чем при взрыве ВВ. При этом в откалываемой породе не образуются трещины. Однако из-за большой опасности в обращении с черным порохом в настоящее время для этих целей используют специальные эластичные ВВ с низкими скоростями детонации 2–3 км/с (рис. 1).

Незаменимы ВВ и при разведке земных недр. Разработка и использование быстрых, дешевых и надежных способов обнаружения полезных ископаемых в земной коре являются весьма актуальными задачами. Одним из самых эффективных геофизических методов разведки полезных ископаемых является сейсмический, основанный на закономерностях распространения в толще земной коры возбужденных взрывом упругих волн. С помощью сейсморазведки ведут работы по поиску месторождений нефти и газа, угля, металлических руд, изучают обширные геологические массивы, составляют прогноз землетрясений и т.д. Принцип сейсморазведки основан на различии в упругих свойствах горных пород, что приводит к изменению скорости

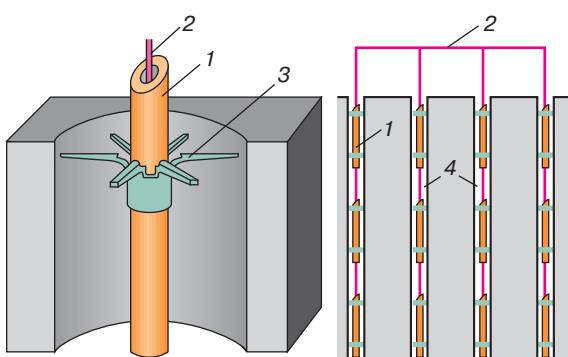


Рис. 1. Схема расположения эластичных трубчатых зарядов “Гранилен” в шпурах: 1 – заряд, 2 – детонирующий шнур, 3 – центратор, 4 – шпуры

распространения сейсмических волн. Например, в граните она составляет около 6 км/с, в каменной соли – 4 км/с, в воде и песке – всего 1,5 км/с. Встречая на своем пути поверхности, разделяющие породы, упругие волны отражаются от них, преломляются и частично возвращаются на поверхность Земли. Если на исследуемом участке расположить сейсмографы (специальные приборы, фиксирующие колебания почвы), то по времени прихода отраженных волн можно определить глубину и форму залегания различных горных пород.

С помощью сейсморазведки во всем мире открыто и разведано множество месторождений, в частности нефтяных и газовых. Этот метод применяют также для изучения глубинного строения (мантии) Земли. Используя заряды ВВ массой в несколько сот килограммов и высокочувствительные датчики, можно получить сведения о свойствах горных пород, залегающих на глубине 150 км и более.

Для возбуждения сейсмических волн используют заряды ВВ массой от 0,2 до 100 кг, размещенные в скважинах глубиной от 1 до 100 м, а иногда и прямо на поверхности Земли. Этот же метод применили американские исследователи для зондирования глубинных слоев Луны во время одной из экспедиций на космическом корабле “Аполлон”.

Сравнительно новым и эффективным способом геофизической разведки является зондирование глубинных слоев Земли с помощью мощного электрического разряда, создаваемого магнитогазодинамическими (МГД) генераторами, работающими на твердых плазменных топливах. Принцип действия таких установок основан на образовании высокоинициированной плазмы при горении порохового заряда, который изготавливается на основе баллиститного пороха с легкоионизирующими добавками – солями калия или цезия (обычно нитратами). Такие плазменные топлива имеют высокую электропроводность продуктов горения, на три порядка и более превосходящую таковую у обычных порохов. При движении плазмы с высокой скоростью в магнитном поле в соответствии с законами электромагнитной индукции можно осуществлять прямое преобразование химической энергии пороха в электрическую. Разработанные в России передвижные МГД-установки имеют мощность 20–100 МВт, заряд твердого топлива массой 60–700 кг, время работы 2,5–10 с, сила тока нагрузки 5 кА и выше (рис. 2).

Пороха и ВВ широко используются при бурении и эксплуатации скважин. Прострелочные работы в скважинах включают в себя отбор образцов горных пород, пластовых жидкостей и газов, а также перфорацию (прободение) обсадных колонн для вскрытия продуктивных пластов.

Взятие образцов породы с нужных глубин, осуществляемое с помощью специального взрывного устройства – бокового стреляющего грунтоноса, – самый надежный способ изучения горных пород на

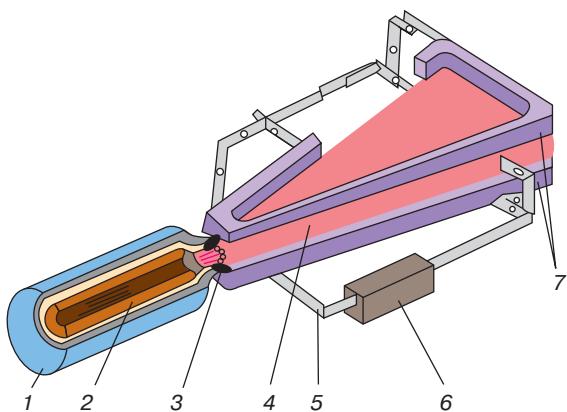


Рис. 2. Принципиальная схема МГД-генератора: 1 – газогенератор плазмы, 2 – заряд твердого плазменного топлива, 3 – МГД-канал, 4 – поток плазмы, 5 – коммутатор, 6 – нагрузка, 7 – магнитная система

больших глубинах. Перфорация скважин осуществляется для вскрытия пластов, то есть создания каналов для прохода нефти или газа в скважину. При этом обычно используют кумулятивные перфораторы, снаряженные специальными ВВ (рис. 3). При взрыве кумулятивная плазменная струя пробивает (прожигает) боковую стенку обсадной трубы и создает отверстие, через которое нефть или газ поступают в скважину. К сожалению, со временем производительность скважины падает. Это происходит вследствие забивки каналов и трещин в пластах различными отложениями (осадками), что уменьшает проницаемость пластов и вызывает снижение пластового давления в залежи вплоть до полного пре-

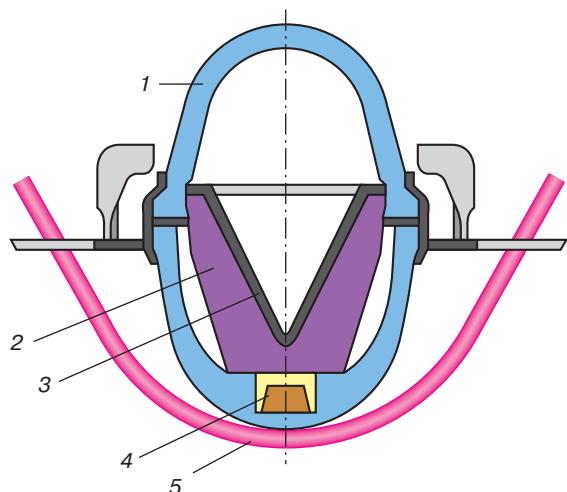


Рис. 3. Кумулятивный заряд для бескорпусного перфоратора: 1 – оболочка заряда, 2 – шашка заряда, 3 – облицовка заряда, 4 – промежуточный детонатор, 5 – детонирующий шнур

кращения нефтеотдачи. Одним из эффективных путей преодоления этого нежелательного процесса и интенсификации добычи нефти и газа является повышение проницаемости прискважинной зоны за счет применения специальных пороховых скважинных генераторов давления, создающих искусственные трещины в пласте.

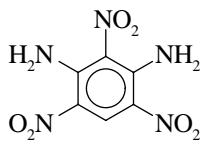
При горении порохового заряда, опущенного в скважину, образующиеся газообразные продукты сгорания создают давление, равное или превышающее пластовое. Это давление вызывает разрывы пласта и образование остаточных трещин, а также оказывает термическое и химическое воздействие на пласт, приводящее к растворению твердых парафиновых, асфальтосмолистых и других конденсированных отложений, забивающих каналы в пластах. К газогенератору обычно присоединяют кумулятивный перфоратор для образования в стенке скважины каналов, через которые в пласт закачивают газожидкостную смесь.

Ввиду постепенного исчерпания залежей нефти и газа на малых и средних глубинах все большее значение приобретают разведка и эксплуатация глубинных месторождений. В настоящее время средняя глубина нефтяных и газовых скважин в России составляет 2 км. Температура на этой глубине достигает 100°C, в то время как на глубине 4–4,5 км она составляет уже 200°C, а на глубинах 6–7 км, где в настоящее время ведется разведочное бурение, температура может достигать 300°C. Экстремальные температурные условия сильно усложняют применение ВВ, учитывая, что заряд должен находиться при столь высокой температуре достаточно длительное время – от 6 ч до 2 сут.

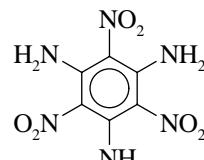
Большинство известных промышленных ВВ начинают в заметной степени разлагаться уже при 160–200°C и поэтому непригодны при глубинном бурении. В связи с этим возникла проблема разработки термостойких взрывчатых материалов, которые могли бы обеспечить безопасное и эффективное проведение прострелочно-взрывных работ в условиях глубинных высокотемпературных скважин.

Формулы типичных представителей термостойких ВВ приведены ниже, а некоторые их свойства – в табл. 1.

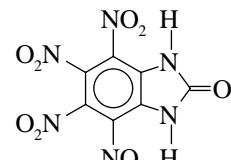
Широкие исследования, проведенные в России, США и других странах, показали, что наибольшие перспективы имеют высокоплавкие соединения, содержащие ди- и тринитрофенильные (пикрильные, Pic) заместители. Это связано с тем, что нитрогруппа в ароматических соединениях обладает наиболее высокими активационными параметрами гомолитического разрыва связи C–N, обычно являющегося первичным актом термического распада нитросодержащих ВВ, а также тем, что скорость термораспада ВВ в кристаллическом состоянии значительно ниже (на порядок и более), чем в жидким.



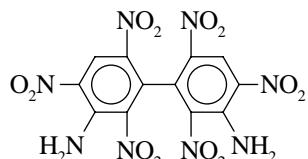
1,3,5-Тринитро-2,4-диаминобензол (I)



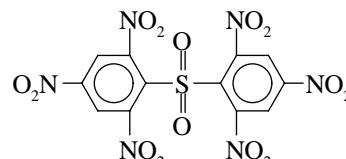
1,3,5-Тринитро-2,4,6-триаминобензол (II)



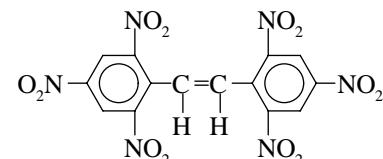
4,5,6,7-Тетранитро-бензимидазол-2-он (III)



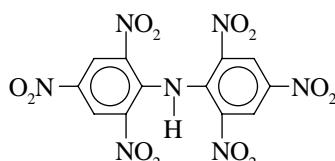
3,3'-Диамино-2,2',4,4',6,6'-гексанитродифенил (IV)



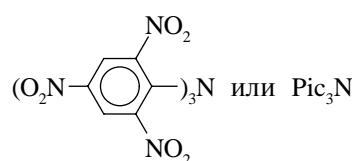
2,2',4,4',6,6'-Гексанитродифенилсульфон (V)



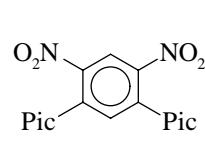
2,2',4,4',6,6'-Гексанитро-стильбен (VI)



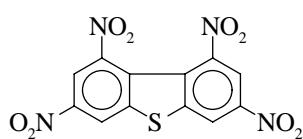
2,2',4,4',6,6'-Гексанитро-дифениламин (VII)



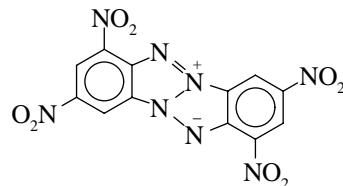
2,2',2'',4,4',4'',6,6''-Нонанитро-трифениламин (VIII)



Октанитротерфенил (IX)



3,5,6,8-Тетранитро-дibenzo[b,d]тиофен (X)



2,4,8,10-Тетранитродibenzo[d]-6-триазоло[2,1-a]11-триазолат (XI)

Последнее обусловлено значительно меньшей свободой колебаний атомов и групп в молекулярной кристаллической решетке по сравнению с жидкостью. Повышение температуры плавления нитросоединения достигается либо введением в ароматическое кольцо амино(имино)групп, способных с образованием пространственной сетки межмолекулярных водородных связей с нитрогруппами, как в соединениях (I–IV), либо объединением в одной молекуле двух или трех полинитрофенильных заместителей как непосредственно [соединения (IV, IX)], так и через “мостиковые” атомы и группы [соединения (V–VIII, X, XI)].

В табл. 1 приведены значения критической температуры и критического периода индукции термостойких ВВ, рассчитанные на основе модели развития теплового взрыва и характеризующие предельные значения температуры и времени пребывания заряда ВВ в скважине. Как видно, с помо-

щью таких ВВ могут быть решены задачи глубинного бурения нефтяных и газовых скважин, хотя синтез этих веществ достаточно сложен и соответственно стоимость их высока.

Еще одной важной областью применения высоконергетических веществ является их использование в качестве компактных газогенераторов и аккумуляторов давления, позволяющих за короткое время создавать необходимое давление в различных резервуарах и производственных системах, например в средствах пожаротушения для распыления огнегасящих жидкостей и порошков, в исполнительных механизмах, мгновенно срабатывающих по команде автоматического устройства или оператора (перекрытие трубопроводов при пожаре или взрыве, системы экстренного торможения на транспорте, подушки безопасности в автомобилях, защищающие водителя и пассажира при столкновениях и авариях), для поддува баллонов и емкостей в

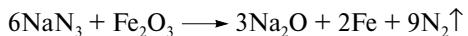
Таблица 1. Свойства термостойких ВВ

| Номер соединения | Температура плавления, °C | Критическая температура, °C | Критический период индукции, мин | Скорость детонации, км/с | Плотность, г/см ³ |
|------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| I | 289 | — | — | 7,69 | 1,84 |
| II | 350 | 290 | 300 | 8,00 | 1,94 |
| III | 311 | 245 | 610 | 7,20 | 1,65 |
| IV | 304 | — | — | 7,50 | 1,79 |
| V | 307 | 260 | 600 | 7,20 | 1,70 |
| VI | 318 | 267 | 3300 | 7,13 | 1,74 |
| VII | 249 | 230 | 1300 | 7,40 | 1,78 |
| VIII | 346 | 289 | 1200 | 7,20 | 1,62 |
| IX | 360 | 298 | 480 | 6,70 | 1,67 |
| X | 347 | 304 | 360 | 7,40 | 1,75 |
| XI | 378 | 305 | 720 | 7,20 | 1,85 |

аэрозольных генераторах и распылителях для обработки растений и животных, развертывания систем мягкой посадки и средств аварийного спасения на воде, создания рабочего тела в газодинамических лазерах и т.п.

Как правило, эти устройства изготавливаются на основе наполненных баллиститных порохов специального состава, обеспечивающих выделение максимального объема газов необходимой, в некоторых случаях достаточно низкой (100–400°C) температуры. В качестве наполнителя-окислителя в таких генераторах обычно используют нитраты щелочных или щелочноземельных металлов, а также охлаждающие добавки, поглощающие значительную часть тепла продуктов сгорания за счет сублимации или термической деструкции.

Для твердотопливных систем газового пожаротушения, а также в подушках безопасности автомобилей применяют генераторы негорючего газа – азота, содержащие азид натрия, оксид железа и полимерное связующее. Горение состава протекает по схеме



Твердые частицы оксида натрия и железа отделяются от азота на фильтрах из углеродных тканей или минеральных волокон.

В последнее время взрывчатые вещества стали использовать для получения сверхтвердых материалов, например алмаза и алмазоподобного нитрида бора. Образование этих материалов из их аллотропных модификаций (графита и гексагонального графитоподобного нитрида бора) обусловлено тем, что при взрыве развиваются высокие температуры и давления, соответствующие области их устойчивого

существования на фазовых диаграммах. При быстром расширении и охлаждении продуктов взрыва происходит закаливание этих модификаций. Конечно, из-за малого времени взрыва получить крупные кристаллы сверхтвердых материалов таким методом невозможно, и размер их частиц обычно не превышает 0,01 мм. Такие материалы широко применяют при создании режущих, абразивно-шлифовальных и буровых инструментов, притирочных и полировальных паст и жидкостей, износостойких кластерных покрытий, материалов для электротехники и электроники, наполненных полимерных композиций, обладающих уникальными физико-механическими свойствами. В США в настоящее время около 20% всех синтетических алмазов производится взрывным методом.

Расход ВВ при детонационном синтезе алмаза составляет 10–15 кг на 1 кг алмазного порошка. Конечно, это делает синтетический алмаз достаточно дорогим продуктом, однако в настоящее время изучается возможность утилизации боеприпасов с истекшим сроком годности для взрывного синтеза сверхтвердых материалов, что должно существенно удешевить их производство.

В последние десятилетия существенно расширились области применения ВВ в металлургии и машиностроении. Например, с помощью взрыва можно получать сплавы металлов с резко различающимися температурами плавления, которые невозможно изготовить традиционными методами, поскольку они не могут одновременно существовать в жидком состоянии. Например, чтобы сплавить вольфрам, плавящийся при 3410°C, с марганцем, кипящим уже при 2150°C, их порошки перемешивают, помещают в капсулу, соединенную с зарядом ВВ, и производят взрыв. В результате образуется требуемый сплав. С помощью взрыва можно быстро и эффективно разрезать и штамповывать самые разные металлы, упрочнять и сваривать изделия любой формы из различных металлов, вальцовывать, пробивать отверстия и ставить заклепки.

Особенно возросла роль ВВ в машиностроении с появлением новых сверхпрочных и тугоплавких сплавов, не поддающихся обработке традиционными методами. Например, шнуровые заряды из эластичных ВВ (полимерные композиционные материалы с ВВ в качестве наполнителя) используют в современном судостроении и электромашиностроении для запрессовки труб в теплообменных аппаратах и парогенераторах, для формообразования трубчатых элементов в электрических машинах и аппаратах. Применение традиционных механических методов обходится значительно дороже и гораздо менее производительно.

Задачи, решаемые в современной технике с помощью высокоэнергетических материалов, значительно расширились в последние годы в связи с применением тонких, “ювелирных” зарядов ВВ малой

массы, функционирующих тем не менее с высокой стабильностью и надежностью. Особенно характерно это для ракетно-космической техники.

К таким задачам относятся разработка систем детонационной автоматики космических аппаратов, создание миниатюрных средств инициирования взрыва, что особенно важно при строго одновременном многоточечном инициировании зарядов на больших поверхностях для генерации ударных волн требуемой формы, изготовление пленочных взрывчатых материалов для поверхностного упрочнения изделий в машиностроении, разработка детонационных триггеров и устройств детонационной логики и т.д.

Перечисленные задачи весьма сложны и требуют создания ВВ и материалов на их основе с заданным специфическим комплексом свойств, главное – с малым критическим диаметром детонации (d_c).

Критический поперечный размер заряда ВВ (диаметр или толщина в зависимости от формы заряда – шнурового или пленочного) – это минимальный размер заряда, по которому еще способен распространяться стационарный детонационный процесс. Величина d_c определяется совокупностью кинетических и термодинамических факторов в газодинамике детонации конкретного заряда ВВ. Так, для сплошных сред (жидкие ВВ и их растворы, моно-кристаллы ВВ) величина d_c определяется протяженностью (L) зоны химической реакции за фронтом ударной волны

$$d_c \sim L \sim D\tau,$$

где D – скорость детонации ВВ, τ – время задержки адиабатического взрыва. Чем меньше τ гомогенных ВВ и, следовательно, более узка зона химической реакции L , тем меньше d_c .

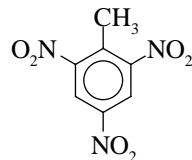
На основании этих представлений величина d_c может быть определена следующим образом:

$$d_c = (C_V T / D)(RT/E) \exp(E/RT), \quad (1)$$

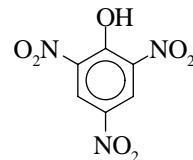
где C_V – теплоемкость ВВ при температуре ВВ T , R – газовая постоянная, E – энергия мономолекулярного распада ВВ.

Для гетерогенных полидисперсных сред (порошкообразные и прессованные поликристаллические ВВ) величина d_c , кроме того, зависит от размера и дефектности кристаллов ВВ, плотности заряда, наличия добавок и других факторов.

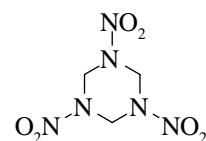
Для обычно используемых в промышленности зарядов традиционных ВВ d_c составляет 5–10 мм (табл. 2), в то время как для решения перечисленных выше задач он не должен превышать 0,1–0,5 мм.



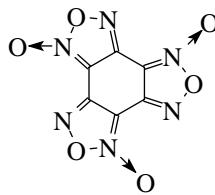
2,4,6-Тринитротолуол, тротил (XII)



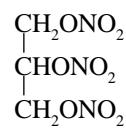
2,4,6-Тринитрофенол, пикриновая кислота (XIII)



1,3,5-Тринитро-1,3,5-триазациклогексан, гексоген (XIV)



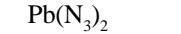
Бензотрифуроксан, БТФ (XV)



Тринитрат глицерина, нитроглицерин (XVI)



Тетранитрат пентаэритрита, ТЭН (XVII)



Азид свинца (XVIII)

Анализ формулы (I) и имеющихся экспериментальных данных показывает, что требуемым критическим диаметром обладают мощные ВВ, имеющие высокие положительные энタルпии образования либо небольшие энергии активации термораспада, такие, как фуроксаны, азиды и нитраты спиртов. В настоящее время созданы пластичные и эластичные взрывчатые материалы, из которых можно изготавливать заряды любой формы (шнуры, ленты, листы, пленки, прутки и т.д.) с d_c менее 0,5 мм. Разработанные на их основе бортовые системы детонационной автоматики ракетно-космических комплексов

Таблица 2. Величина критического диаметра ВВ*

| Номер соединения | d_c , мм |
|------------------|------------|
| III | 2,0 |
| VIII | 1,5–2 |
| XII | 8–10 |
| XIII | 6–9 |
| XIV | 1–1,5 |
| XV**** | 0,5–1 |
| XVI** | 2,0 |
| XVII*** | 1–1,5 |
| XVIII | 0,02 |

* При насыпной плотности веществ с размерами кристаллов 0,1–0,2 мм.

** В жидким состоянии.

По данным А.А. Котомина (плотный заряд, размер кристаллов 1–3 мкм):

*** d_c 0,13 мм.

**** d_c 0,06 мм.

обеспечивают с высокой степенью надежности в автономном режиме мгновенное разделение элементов конструкции, разрезание электрических кабелей, отстрел парашютов, пробой мембран, запуск приборов и т.д. Эти пространственные высокоточные системы являются неразрушающими и безопасочными. Они безопасны и герметичны, при функционировании не выпускают продукты взрыва и не повреждают элементы и научную аппаратуру космического аппарата. В отличие от электронных систем автоматического управления детонационная автоматика обладает повышенной устойчивостью к внешним воздействиям, даже к мощным электромагнитным полям и ионизирующей радиации. Такие системы детонационной автоматики успешно использовали в космических аппаратах типа "Венера", "Марс", "Фобос", а также на автоматических станциях "Вега-1" и "Вега-2" международного научного проекта "Венера — комета Галлея" в 1985 году для формирования аэростатных зондов в атмосфере Венеры (рис. 4).

Разработанные взрывчатые композиции применяются также в средствах инициирования зарядов ВВ. Так, детонирующий шнур с нитевидной сердцевиной из эластичного взрывчатого материала с удельной массой 1 г/м используется для повышения эффективности взрывания скважинных зарядов при добыче угля. Термостойкий высокопрочный детонирующий шнур из эластичного взрывчатого материала применяется при температуре 200°C и давлении 150 МПа в перфораторах и торпедах для повышения нефтеотдачи глубоких нефтяных скважин.

Изложенные примеры использования высокоэнергетических веществ и материалов не охватывают даже малой части существующих и возможных областей их применения в современной технике и народном хозяйстве. Специалисты подсчитали, что уже в настоящее время ВВ, пороха и смесевые твердые топлива используют в мирных целях более чем по 150 различным направлениям, из них на первых местах идут горнодобывающая промышленность, машиностроение, борьба с пожарами и стихийными бедствиями, ракетно-космическая техника, добыча нефти и газа, сельское хозяйство, геология, строительство. Естественно предположить, что в будущем число этих направлений существенно увеличится.

Несмотря на то что сокрушительная сила взрыва в представлении многих неотделимо связана с ужасами войн, несущих гибель тысячам людей, бесмысленные разрушения, уничтожение материальных и культурных ценностей, в руках человека-творца взрывчатые вещества становятся могучей производительной силой, которая служит и будет служить созидательным целям. Автор выражает благодарность профессору А.А. Котомину за помощь в подготовке материала данной статьи.

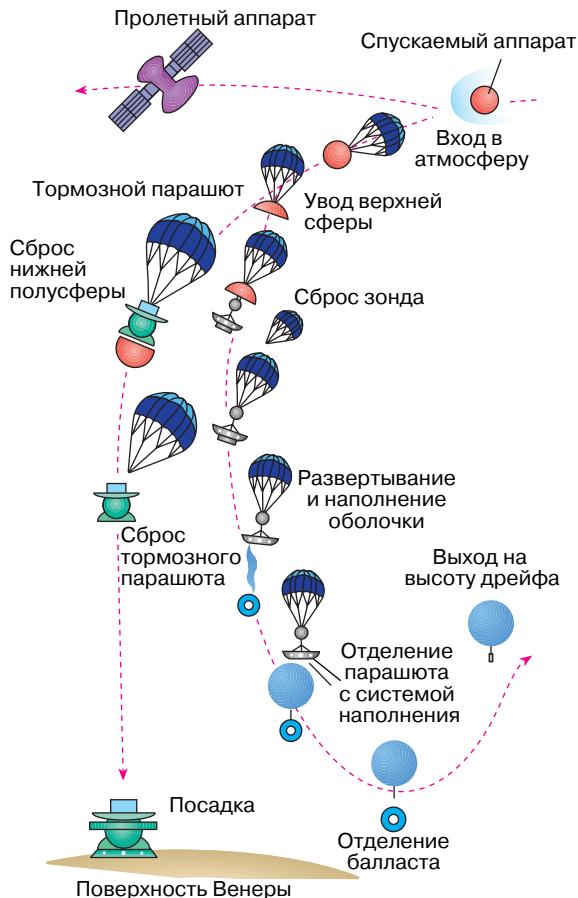


Рис. 4. Схема создания аэростатных зондов космическими станциями "Вега"

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Л.А., Силин В.С. Конверсия. Ч. 1: Пороха, смесевые твердые топлива, пиротехнические изделия и взрывчатые вещества для мирных целей / Под ред. В.А. Желтова. М.: ЦНИИИТКПК, 1993.
2. Иволгин А.И. Созидательные взрывы. М.: Недра, 1975.
3. Андреев К.К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.: Наука, 1966.
4. Термостойкие взрывчатые вещества в условиях глубоких скважин / Под ред. Л.А. Шипицына. М.: Недра, 1981.

* * *

Игорь Васильевич Целинский, профессор, доктор химических наук, зав. кафедрой химии и технологии органических соединений азота Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). Область научных интересов: кинетика и механизмы реакций алифатических, ароматических и гетероциклических нитросоединений, новые синтетические методы в химии органических полизотистых соединений, молекулярная структура и реакционная способность нитросоединений различных классов. Автор более 500 научных статей и обзоров, около 200 изобретений и учебно-методических работ.