

THE EXPLOSION
AND ITS USES

S. A. NOVIKOV

The main principles of explosive transformations are discussed. Some up-to-date explosion technologies which provide the efficient use of explosions in science and industry are briefly outlined and specific examples are given.

Изложены основные положения, характеризующие процессы взрывчатых превращений. Дано краткое описание ряда современных взрывных технологий, позволяющих эффективно использовать взрыв в науке и промышленности. Приведены конкретные примеры.

© Новиков С.А., 1996

**О ВЗРЫВЕ И О ТОМ,
КАКАЯ ОТ НЕГО ПОЛЬЗА**

С. А. НОВИКОВ

Филиал № 4 Московского инженерно-физического института,
Саров (Арзамас-16) Нижегородской обл.

ЧТО ТАКОЕ ВЗРЫВ

Что такое взрыв, знают все. И, наверное, у большинства людей, особенно в наше беспокойное время, это понятие ассоциируется прежде всего с жертвами и разрушениями во время боевых действий, терактов, несчастных случаев. Одним из самых страшных проявлений действия взрыва явилась атомная бомбардировка двух городов Японии в 1945 году. В настоящей статье мы не будем рассматривать подобные трагические проявления действия взрыва. Моей задачей является рассказ о некоторых весьма полезных применениях взрывов (в том числе и ядерных) в последние годы.

Так что такое взрыв? Впервые определение взрыва в России дал М.В. Ломоносов (“О природе и рождении селитры”, 1748 год):

“Взрыв — это очень быстрое выделение большого количества энергии и большого объема газов”.

Что означает “очень быстрое” выделение энергии? (Быстрота — понятие относительное.) Суть этого заключается в том, что выделение энергии при взрыве является более быстрым, чем другие формы выделения энергии в сходных условиях (например, при горении). Чтобы выделившаяся энергия могла осуществить механическое действие, нужно рабочее тело, то есть вещество, которое могло бы передать достаточно большое давление окружающей среде. Этим рабочим телом являются газообразные продукты взрыва, которые, будучи вначале сильно нагретыми и сжатыми, расширяются и производят механическую работу. Скорость распространения процесса взрыва, называемого детонацией, весьма велика и достигает 9 км/с.

Немного истории. Греческий огонь — горючее на основе селитры, способное гореть под водой за счет кислорода, выделяемого при нагревании селитры. История практического применения взрыва начинается в X веке, когда впервые был изготовлен черный порох (смесь мелко раздробленного угля и селитры). Если черный порох находится в замкнутом объеме (в стволе пушки, в грунте и т.п.), происходит быстрое его сгорание, напоминающее взрыв. Если в сосуде с порохом имеется отверстие, порох горит сравнительно медленно, образующиеся газы вырываются из отверстия в виде струи. Такой сосуд является простейшим вариантом реактивного двигателя.

Взрыв одной из крупнейших башен Казанского кремля в 1552 году был осуществлен при осаде Казани войсками Ивана Грозного. Во время царствования Петра I были созданы приборы для определения удельной энергии взрыва черного пороха. Кстати, говорят, что Петру I принадлежит одно из первых предложений по использованию взрыва в мирных целях, способ автоматического тушения пожаров: внутри помещения, охраняемого от пожаров, устанавливали бочку с водой, внутри которой находился заряд из пороха. В различные части помещения от заряда были проложены огнепроводящие шнуры (также снаряженные порохом). Взрыв заряда в бочке с водой по сигналу от загоревшегося участка помещения разбрасывал воду и прекращал пожар.

Развитие теории взрывных явлений связано с именами выдающихся ученых, среди них Л. Эйлер, Гюгонио, Д. Чепмен, Э. Жуге, В. Михельсон, Я. Зельдович, М. Лаврентьев, К. Станюкович, Л. Седов, Г. Петровский, А. Компанец, Ф. Баум и др. Обычные (неядерные) взрывчатые вещества (ВВ) называют химическими ВВ, так как энергия при их взрыве выделяется в виде химических реакций. Большая часть используемых на практике ВВ — это твердые вещества. Применяются жидкие и газообразные взрывчатые вещества, которые обладают, по сравнению с твердыми ВВ, целым рядом специфических особенностей.

Описание процесса распространения взрывчатого превращения по ВВ (детонации) проводится обычно на основе гидродинамической теории детонации. Одним из основных ее условий является то, что взрывчатое превращение происходит в узкой зоне, примыкающей к фронту детонационной волны. За фронтом детонационной волны давление, температура и плотность вещества (это уже продукты взрыва) скачкообразно повышаются. Расширяющиеся продукты взрыва являются рабочей средой, совершающей работу. Основные параметры детонационной волны связаны соотношениями, вытекающими из уравнений сохранения массы, импульса, энергии. Процесс детонации в ВВ во многих случаях возбуждается ударной волной, тем или иным способом создаваемой в заряде ВВ (взрыв капсуля-детонатора, удар быстролетающих осколков или пластины, мгновенный разогрев излучением и т.п.). Детонация возникает, если параметры ударной волны выше некоторых критических значений. Для твердых ВВ критические значения давления составляют $(10 - 50) \cdot 10^8$ Н/м². Кинетическая теория процесса возбуждения детонации очень сложна. Однако предельными условиями возбуждения детонации являются следующие: 1) давление на фронте ударной волны должно быть больше некоторой критической величины $P_{кр}$; 2) должны выполняться определенные соотношения геометрических размеров заряда.

Эти условия вытекают из принципа Ю.Б. Харитона об устойчивом распространении детонации по заряду: устойчивая детонация возможна в том случае, если время химической реакции τ_p больше времени движения боковой волны разрежения к центральным частям заряда, энергия которой передается на фронте ударной волны и поддерживает ее интенсивность на необходимом уровне.

Количественное соотношение для критического диаметра:

$$d_{кр} \approx 2c\tau_p,$$

где c — скорость звука в продуктах детонации.

Возбуждение химических реакций, развитие которых приводит к детонации ВВ, происходит в небольших локальных объемах, которые получили название “горячих” точек. Теория детонационных волн, результаты экспериментальных исследований, описывающие взрывчатые превращения в различных ВВ, широко освещены в многочисленной литературе.

Остановимся на некоторых современных полезных применениях взрывных процессов, на ряде так называемых взрывных технологий.

ВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Различают технологии, основанные на взрыве в контакте с материалом (контактные) и основанные на работе продуктов взрыва (взрыв на расстоянии).

Взрывная резка (контактная)

Один из основных методов взрывной резки материалов основан на использовании явления образования кумулятивных струй. Схема кумулятивного заряда с конической выемкой и металлической облицовкой приведен на рисунке 1а. Схема формирования металлической кумулятивной струи показана на рисунке 1б. При сжатии металла к оси заряда возникают огромные (до нескольких десятков гигапаскалей) давления в узкой зоне (явление кумуляции), расплавленный металл в виде тонкой струи с большой скоростью “выплескивается” по оси заряда. При взаимодействии этой струи с преградой происходит ее пробитие на большую глубину (именно так кумулятивные снаряды поражают танковую броню). Схема пробития преграды струей показана на рисунке 1в. Глубина пробития оценивается по формуле

$$H = L \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_n}},$$

где L — длина струи, определяемая длиной кумулятивной выемки, ρ_c — плотность материала струи, ρ_n — плотность преграды.

Небольшие заряды такого типа широко используются для пробивания отверстий на большой

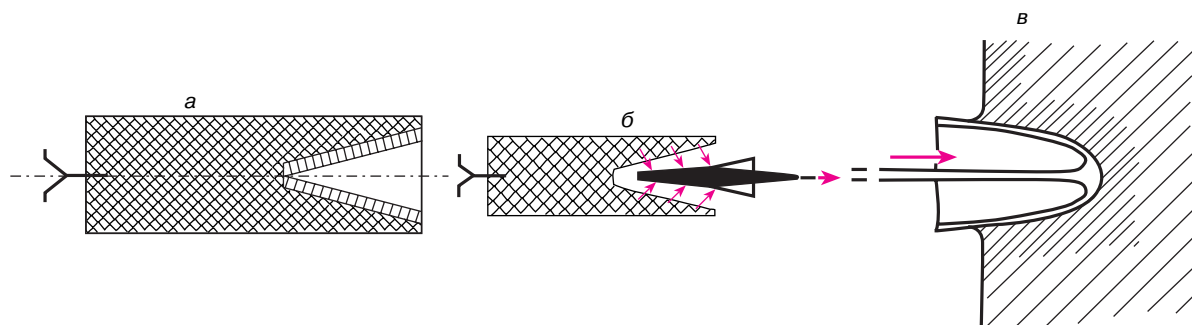


Рис. 1. Действиекумулятивного заряда. а – Схемакумулятивного заряда с конической выемкой и металлической облицовкой этой выемки; б – схема формированиякумулятивной струи; в – схема пробивания преградыкумулятивной струей.

глубине в трубах (перфорации) при добыче нефти и газа (такие заряды называются перфораторами).

Если заряд сделать не осесимметричным, а удлиненным в одном направлении (такие заряды и получили название удлиненныхкумулятивных зарядов УКЗ), то образующаяся в виде лезвия ножакумулятивная струя позволяет разрезать листы металла толщиной до 100 мм. Обычно такие УКЗ изготавливают с применением пластичных ВВ, что позволяет располагать заряды на любой криволинейной поверхности, что является существенным при разрезке различных конструкций (корабли, самолеты, вагоны и т.п.). Тщательно отработанные УКЗ позволяют даже проводить разборку боеприпасов без взрыва находящегося в них заряда ВВ. Это является очень существенным фактором с точки зрения экологии и позволяет утилизировать как ВВ, так и дорогостоящие конструкционные материалы.

Для разрезки массивных стальных конструкций толщиной много больше 100 мм в последние два года применялся способ, основанный на взаимодействии так называемых ударных волн разрежения (УВР) в железе и стали, нагруженных ударных волн с давлением, превышающим давление фазового перехода в железе.

Немного об УВР. Профиль давления в обычной ударной волне показан на рисунке 2а: он состоит из скачкообразного увеличения давления на фронте ударной волны и плавного его уменьшения в волне разрежения.

В ряде веществ, в частности в железе, при давлении ~130 ГПа происходит мгновенная перестройка кристаллической решетки железа из кубической в гексагональную, что приводит к значительному изменению плотности железа. При снятии давления в волне разрежения происходит, соответственно, обратный фазовый переход. Это приводит к тому, что профиль давления в ударной волне значительно изменяется (рис. 2б): образуется область скачкообразного уменьшения давления, то есть формируется ударная волна разрежения. Это явление экспери-

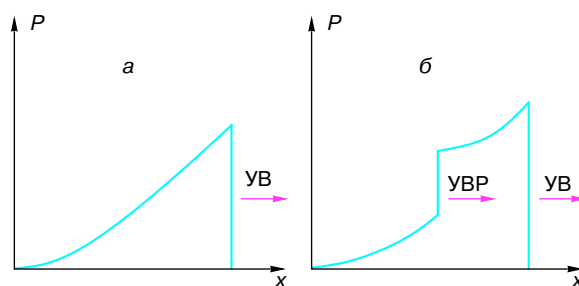


Рис. 2. Профиль импульса давления с ударным фронтом (а) и профиль импульса давления, включающий ударную волну разрежения (б).

ментально было обнаружено Я.Б. Зельдовичем, А.Г. Ивановым и автором и зарегистрировано в качестве открытия (Диплом № 321). При взаимодействии (столкновении) УВР в очень узкой зоне шириной несколько ангстрем возникают растягивающие напряжения, значительно превышающие прочность железа и стали. Происходит разрушение стальной конструкции на две части с очень ровными поверхностями разрушения. Такой способ практически не имеет ограничений по толщине металла и требует существенно (в десятки раз) меньшего количества ВВ по сравнению с обычным методом (взрыв большого количества ВВ в контакте с конструкцией), что особенно существенно при подводных взрывах. На этом принципе разработан метод фрагментации морских и океанических нефтяных платформ. На рисунке 3 представлена фотография, иллюстрирующая этот метод.

Взрывная сварка

Сварка взрывом обеспечивает надежное соединение двух пластин (двухслойный материал) и нескольких пластин (многослойный материал). Пластины могут быть из различных металлов (не свариваемых с помощью обычной сварки), геометрические размеры пластин могут достигать



Рис. 3. Фотография стального цилиндра диаметром ~500 мм, разрезанного с помощью ударных волн разрежения.

нескольких метров. Механизм сварки напоминает образование кумулятивной струи, образующейся в зоне соударения пластин.

Компактирование взрывом

К числу контактных взрывных технологий относится взрывное компактирование. Одним из наглядных примеров таких операций является взрывное компактирование ультрадисперсных алмазов (УДА). УДА с размерами частиц 2 – 20 нм получают в взрывных экспериментах за счет углерода, входящего в состав ВВ. Однако для практических целей частицы таких малых размеров не нужны. Для создания, например, абразивных инструментов требуется алмазный порошок с размерами более 10 мкм. Спекание (компактирование) УДА до таких размеров – сложная технологическая задача. В последние годы разрабатываются эффективные способы ее решения. Один из очевидных путей – создание давлений ~10 ГПа (10 ГПа – прочность алмаза) для пластического спекания порошка. Основная трудность этого направления – обеспечить отсутствие обратного перехода (алмаз → графит), который неизбежно начинается при таких давлениях ударного сжатия. Второй путь, недавно освоенный экспериментаторами, – создание сравнительно небольших ударных давлений, но действующих большее время (~100 – 400 мкс). При этом из-за малой температуры ударного сжатия не происходит указанного обратного перехода и получается >90% прозрачных алмазных частиц с размерами до 1 мм, что дает возможность использования их и для декоративных целей. Оба этих направления реализованы в разработанных в последние годы специальных

взрывных устройствах, позволяющих сохранять укрупненные алмазные частицы после нагружения.

Можно привести еще много примеров использования “контактных” взрывов ВВ в народном хозяйстве. Завершим этот раздел совсем необычным примером: взрыв рисует. Некоторые из конденсированных ВВ, например, изготовленные на основе мелкодисперсных порошков или жидкие ВВ, обладают очень малым критическим диаметром, о котором говорилось выше, то есть детонируют в виде очень тонких слоев (десятые доли миллиметра). Кратковременность импульса давления, передаваемая при этом преграде, на которой располагается тонкий слой ВВ, приводит к тому, что величину давления в ударной волне можно легко регулировать, размещая под ВВ тонкие слои инертных материалов (например, бумага и т.п.), что позволяет изменять при детонации ВВ глубину отпечатка на поверхности пластичной преграды (медь, алюминий). Этот метод взрывной гравировки применяется для изготовления прекрасных рисунков на металле. (См., например, рис. 4, где представлен отпечаток листьев рябины.)



Рис. 4. Фотография отпечатка ветки рябины на медной пластине при детонации тонкого слоя взрывчатого вещества.

ШТАМПОВКА ВЗРЫВОМ

Относится к числу “неконтактных” взрывных технологий.

Взрывная штамповка – один из наиболее перспективных процессов обработки металлов. Сущность этой операции – передача энергии взрыва металлической заготовке (пластине) через воздух,

воду или сыпучие среды (неконтактный взрыв). Для осуществления штамповки нет необходимости в мощных дорогостоящих прессах. В производственной операции используется только часть штампа (матрица), которая к тому же может быть изготовлена из недорогого легко обрабатываемого материала.

ВЗРЫВНЫЕ УСТАНОВКИ

Отдельным направлением взрывных технологий является использование специальных взрывных генераторов давления (ВГД) многоразового действия в качестве машин, приводящих в движение различные рабочие механизмы. ВГД представляет собой прочную стальную камеру, надежно локализирующую образующиеся при взрыве продукты взрыва, соединенную с помощью дросселирующего устройства с рабочим механизмом. Энергоемкость таких ВГД очень велика. Примером их применения может служить взрывная установка для разбивания крупногабаритных камней в горнодобывающей промышленности. Куски самого прочного гранита размером $\sim 2 \times 2 \times 2$ м разбиваются на мелкие фрагменты с одного удара. При этом в ВГД подрывается всего несколько десятков грамм обычного аммонита.

Другой пример – взрывная установка, построенная по принципу гильотины: разгоняемый с помощью ВГД нож легко разрубает на фрагменты такие объемные конструкции, как фюзеляж самолета, его крылья.

Отметим, что применение УКЗ для разрезки таких конструкций весьма неэффективно по затратам и времени.

Основные преимущества таких взрывных установок:

- Их мобильность. Установки легко разбираются (если это необходимо) и транспортируются любым видом транспорта.
- Они не требуют стационарных источников энергии.
- Экономичность.

Отметим еще одно интересное применение ВГД в горнодобывающей промышленности для добычи минералов. Дросселирование камеры ВГД позволяет осуществить “плавное” повышение продуктов взрыва в шпуре, в котором размещен ВГД, что предотвращает дробление драгоценных минералов при взрывном методе их добычи.

ВЗРЫВ-СТРОИТЕЛЬ

Велика роль взрыва в строительных работах. Основным направлением использования ВВ в строительном деле являются взрывы на выброс. Теория образования взрывных полостей и воронок разработана в настоящее время достаточно глубоко. При взрыве сосредоточенных зарядов выбрасываемая порода распределяется симметрично по сторонам создаваемой воронки. Во многих практи-

чески важных случаях осуществляется направленный выброс породы, позволяющий перемещать огромные массы породы на большие расстояния. Характерным примером направленного взрыва на выброс является строительство взрывом противоелевой плотины в урочище Медео в районе Алматы (октябрь 1968 года).

ЯДЕРНЫЙ ВЗРЫВ

Говоря о взрывах, нельзя обойти вниманием явление ядерного взрыва, тем более что об его использовании на пользу человечества практически ничего не известно. Безусловно, что обязательным условием его использования на Земле должна быть “чистота” проводимых экспериментов, то есть обеспечено отсутствие загрязнения окружающей среды радиоактивными продуктами. При выполнении этого условия огромная энергия подземного ядерного взрыва в буквальном смысле может свернуть горы. Одним из наглядных примеров полезного использования подземного ядерного взрыва является гашение мощного газового факела в Узбекистане в 1966 году. До этого факел горел 3 года, выбрасывая в сутки 18 млн. кубометров газа. Скважина была перекрыта с помощью подземного взрыва небольшого ядерного заряда.

Энергия подземного ядерного взрыва выделяется с такой интенсивностью, что менее чем за миллионную долю секунды сам ядерный заряд и материал прилегающих к нему конструкций превращается в горячую плотную плазму с температурой до десятка миллионов градусов. Этот раздувающийся шар с гигантским давлением превращает горную породу, окружающую взрывную камеру, в плотный горячий газ. Величина сжатия породы достигает четырех–пяти раз. Распространяющаяся от центра взрыва ударная волна с начальной скоростью до десятков километров в секунду вовлекает в зону своего действия все новые и новые массы породы. За тысячи километров от места взрыва, даже на противоположной стороне земного шара эхо взрыва может быть зафиксировано как сейсмическое колебание земной коры.

Второй, не менее впечатляющий пример, о возможности реализации которого в последнее время неоднократно говорят ученые всего мира: проблема защиты Земли от опасных космических объектов (ОКО). Астероид как опасный космический объект, – именно такой случай. О реальности этой опасности совсем недавно напомнило столкновение кометы Шумейкеров–Леви с Юпитером. По-видимому, единственным известным оружием защиты от ОКО является ракетно-ядерный удар. Предлагается два способа воздействия на ОКО:

- во-первых, можно изменить траекторию полета приближающегося к Земле астероида, оттолкнув его мощным ядерным взрывом, чтобы увести подальше от Земли;

• во-вторых, раздробить, разрушить опасное космическое тело, в этом случае, правда, угроза его падения на Землю сохраняется, уменьшается лишь уровень воздействия, осколки астероида — это все-таки осколки...

ЛИТЕРАТУРА

1. *Крупин А.В., Соловьев В.Я.* и др. Обработка металлов взрывом. М.: Металлургия, 1991. 495 с.
2. *Глушак Б.Л., Новиков С.А.* и др. // Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского ун-ва, 1992. 192 с.
3. *Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А.* Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 295 с.
4. *Новиков С.А.* Взрывные технологии и конверсия / В сб. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1994. В. 2. С. 40 — 47.
5. *Таржанова Л.Г.* Увидеть небо в звездах. // Атом. 1995. С. 29 — 30.

6. *Лин Э.Э., Новиков С.А., Куропаткин В.Г.* Динамическое компактирование ультрадисперсных алмазов // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31. № 5. С. 136 — 138.

7. *Баторин В.Д., Мокшенков М.М., Фокеев С.М.* Ликвидация аварийного газового фонтана на Урита-Булакском месторождении ядерным взрывом // Атом. 1995. № 2. С. 25 — 27.

* * *

Станислав Александрович Новиков, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии естественных наук, начальник отдела Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, зав. кафедрой "Теоретическая и экспериментальная механика" филиала № 4 Московского инженерно-физического института. Область научных интересов — исследование поведения материалов и конструкций при интенсивных импульсных нагрузках, создаваемых взрывом, высокоскоростным ударом, импульсным разогревом. Автор четырех монографий, 250 статей и 1 открытия.