

ВЗРЫВ

А. П. ЕРШОВ

Новосибирский государственный университет

THE EXPLOSION

A. P. ERSHOV

The fundamentals of the explosion physics are considered. The most interesting kinds of explosions and the accompanying phenomena are discussed, as well as applications of explosion.

Рассмотрены основы физики взрыва. Обсуждены конкретные виды взрывов, сопровождающие их явления, а также применения взрыва.

Взрыв – это быстрое выделение энергии. При некоторой нечеткости такое определение достаточно наглядно. Вначале кратко рассмотрим наиболее характерные примеры взрывов.

Химические взрывы. Изобретенный в древнем Китае (и вновь открытый в средневековой Европе) порох был первым компактным и мощным источником энергии. Позднее появились взрывчатые вещества (ВВ), такие, как тротил, несравненно более разрушительные. Кроме военных нужд ВВ применяются в промышленности и горном деле. Сейчас они производятся сотнями тысяч тонн в год. В последнее время все чаще химические взрывы ассоциируются в массовом сознании с террористическими актами и авариями при перевозке и хранении ВВ.

Электромагнитный взрыв. Конденсатор емкостью 100 мкФ, заряженный до напряжения 300 В, эффектно пережигает медную проволочку диаметром 150 мкм (из таких проволочек состоит обыкновенный монтажный провод). Более мощные взрывы возможны при коротком замыкании электрических сетей, а также при фокусировке мощного импульса света лазера.

Кинетические взрывы. Падение кометы Шумейкеров–Леви на Юпитер в 1994 году было одной из самых грандиозных катастроф в Солнечной системе на памяти человечества. Считается, что падение на Землю 70 млн лет назад астероида размером около 10 км привело к вымиранию динозавров, освободив жизненное пространство для наших предков – млекопитающих.

Ядерные взрывы. Атомные и термоядерные бомбы несомненно относятся к важнейшим символам нашего века. Человек, освоив ядерную энергию, достиг технологического могущества, сравнимого по мощности с природными факторами.

Важнейший процесс во Вселенной – взрывы сверхновых звезд. Звезды второго поколения, в том числе Солнце, содержат выбросы ранних сверхновых. Поэтому в Солнечной системе и на Земле много сравнительно тяжелых элементов, без которых невозможна жизнь.

Наконец, и сама Вселенная возникла в результате Большого взрыва (Big Bang) около 15 млрд лет назад.

ЭНЕРГИЯ ВЗРЫВА

Взрывчатые материалы удобно сравнивать по удельной энергии Q , рассчитанной на единицу массы. Зная массу и скорость пули, а также размеры патрона, легко получить, что 1 г пороха выделяет несколько килоджоулей. При взрыве ВВ выделяется примерно такая же энергия. Характерная величина 1 ккал/г, или 4,2 кДж/г, соответствует удельной энергии тротила.

Энергия кинетического взрыва при скорости удара V равна $mV^2/2$, а на единицу массы приходится $V^2/2$. Тротильный эквивалент 4,2 МДж/кг соответствует скорости $\sqrt{2 \cdot 4,2 \cdot 10^6} \approx 3000$ м/с. Входя в атмосферу Земли, объекты внеземного происхождения имеют скорость больше второй космической. При 12 км/с килограмм массы эквивалентен 16 кг тротила, а при 60 км/с “космическая взрывчатка” в 400 раз калорийнее тротила.

Энергия ядерных взрывов — от килотонн до десятков мегатонн тротильного эквивалента. Для атомного взрыва требуется в начальной стадии химический взрыв, образующий критическую массу (например, выстрел одной частью уранового заряда в другую). Термоядерный заряд включается предварительным атомным взрывом, излучение которого сжимает термоядерное горючее. Как видно, мощные взрывы запускаются от более слабых источников.

МАСШТАБ ХИМИЧЕСКОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

При взрыве и горении из сложных веществ образуются довольно простые, такие, как CO_2 , CO , N_2 , H_2O . На одну молекулу продуктов реакции при $Q = 1$ ккал/г и среднем молекулярном весе 30 г/моль приходится $\sim 2 \cdot 10^{-19}$ Дж, или около 1 эВ.

Приведем простую, школьную оценку этой величины. Энергия электрона в атоме размера $a \approx 10^{-10}$ м порядка $E = e^2/(4\pi\epsilon_0 a) \approx 14$ эВ. При химических реакциях происходит обмен электронами, переход их на другие уровни. Значит, эффект составит некоторую долю E , а именно порядка электронвольта на молекулу. Из этой оценки следует, что предел энергии взрыва практически уже достигнут (тем более что далеко не каждое взрывчатое соединение может применяться: ВВ должны удовлетворять очень жестким критериям устойчивости).

При нормальной температуре 300 К на поступательное движение двухатомной молекулы приходится энергия $3kT/2 \approx 0,04$ эВ, а при учете вращения — около 0,07 эВ. Энергии 1 эВ на молекулу соответствует температура порядка 4000 К.

ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ

Первый дошедший до нас рецепт черного, или дымного, пороха (1250 год) гласил: “Возьми 1 фунт живой серы, 2 фунта липового или ивового угля, 6 фунтов селитры. Очень мелко разотри эти три вещества на мраморной доске и смешай”. Как видно, черный порох — смесь горючего и окислителя. Поэтому состав работает в замкнутом пространстве (гильза, канал ствола), без кислорода воздуха. Из-за малой плотности воздух и не мог бы поддерживать столь интенсивное горение. Эффект взрыва пороха обеспечивают высокая концентрация окислителя и малый размер частиц. Бездымный баллистический порох (получен А. Нобелем в 1888 году) представляет собой смесь нитратов целлюлозы с нитроглицерином. Эти вещества, как и большинство других ВВ, содержат и горючее и окислитель в каждой молекуле. Атомы углерода и водорода окисляются кислородом, чаще всего входящим в группы NO_2 .

Пороховой заряд ружья или орудия горит. Горение это весьма быстрое. Время выстрела порядка отношения длины ствола к скорости пули или снаряда, что составляет около 1 мс (миллисекунда) для стрелкового оружия и нескольких миллисекунд для артиллерии. Нетрудно показать, что при выстреле из пушки давление в стволе порядка 500 МПа, или 5000 атм. Скорость горения пороха растет с давлением, что резко усиливает метательное действие. На открытом воздухе порох горит хотя и эффективно, но гораздо медленнее, без особых механических проявлений. Пороховые артиллерийские бомбы и мины, применявшиеся при осаде крепостей, работали именно за счет ускорения горения пороха в замкнутом объеме.

Ясно, что взрыв начинки современного снаряда еще гораздо мощнее взрыва пороха. Большая мощность означает малое время реакции. Такое быстрое взрывное превращение называют детонацией. Разница между горением и детонацией — в способе распространения процесса. Горение распространяется за счет движения тепловой волны, переноса тепла от горячих продуктов реакции к непрореагировавшему заряду. Именно поэтому на скорость горения влияют внешние условия. Например, рост давления усиливает теплообмен и ускоряет горение.

Детонацию же распространяет ударная волна — весьма сильное и резкое сжатие вещества. Рост давления, плотности и температуры за фронтом волны запускает быструю реакцию. Образуется устойчивый комплекс — детонационная волна, состоящая из ударной волны и следующей за ней зоны химической реакции (модель ЗНД, по именам Я.Б. Зельдовича, Дж. фон Неймана и Э. Деринга). Выделение энергии в зоне реакции поддерживает ударную волну, так что процесс

распространяется с постоянной скоростью, зависящей только от свойств ВВ.

В табл. 1 для трех ВВ приведены суммарные формулы и основные детонационные параметры: удельная энергия взрыва Q , начальная плотность ρ , скорость детонации D , давление P и температура T на момент завершения реакции. Выделяемая энергия (и конечная температура), как и следовало ожидать, примерно те же, что и для пороха. Но скорость детонации весьма велика. Заряд длиной в 20 см полностью прореагирует за 20–30 мкс. Это на два порядка быстрее, чем сгорает порох при выстреле. Поскольку достигаются громадные давления в 20–30 ГПа, то есть 200–300 тыс. атм, влиять на детонацию извне очень трудно. Этим и объясняется стабильность детонационной волны.

Между бризантными ВВ и порохами нет принципиальной разницы. Тротильные шашки обычно спокойно горят в костре без взрыва. Но в замкнутом объеме, при измельчении вещества горение ВВ легко переходит в детонацию. Горение пороха гораздо устойчивее, чем горение ВВ, так что детонации при штатных условиях использования не возникает. Это обеспечивается физическими свойствами пороха, в частности устойчивостью к дроблению. Однако при воздействии очень сильной ударной волны некоторые пороха детонируют.

Эра черного пороха продолжалась шесть веков. Последний крупный конфликт с преобладанием этого состава – франко-прусская война 1870–1871 годов. Переход артиллерии на бездымный порох требовал модернизации и взрывчатых веществ. Хотя динамит Нобеля применялся в гражданских областях с 1867 года, для снарядов он был недостаточно безопасен. В 1873 года были обнаружены взрывчатые свойства пикриновой кислоты (до того давно известной как желтый краситель). Под названиями мелинит, шимоза она применялась в англо-бурской и русско-японской войнах. Однако кислота склонна образовывать в контакте с металлами чувствительные соли – пикраты.

Среди применяемых сейчас ВВ наиболее знаменит тротил (тринитротолуол, ТНТ, тол). К первой мировой войне ТНТ вытеснил пикриновую кислоту. Тротил отличается химической стойкостью, он исключительно безопасен и нечасто взрывается даже при прострелива-

нии пульей. Чтобы запустить ТНТ, нужен инициатор – взрыв более чувствительного ВВ.

Гексоген стал широко применяться в ходе второй мировой войны. Смесь тротила с гексогеном и сейчас снаряжают боеприпасы. Такой состав в определенной степени сочетает безопасность и стойкость тротила с мощностью гексогена.

НОРМАЛЬНАЯ ДЕТОНАЦИЯ. КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Попытаемся оценить давление детонации по школьной формуле: $P = \rho RT/\mu$. При плотности в детонационной волне около 2 г/см^3 получаем 2 ГПа, или 20 тыс. атм. Это много по бытовым меркам, но на порядок меньше, чем реальные данные в табл. 1. Продукты взрыва не идеальный газ! Когда плотность вдвое превышает плотность воды, существенно отталкивание молекул, что и объясняет величину давления.

В условиях взрыва характерная скорость молекулы продуктов должна быть порядка 2 км/с. Для идеального газа примерно такой же была бы скорость звука. И здесь проявляется эффект плотности: реальная скорость звука в 2–3 раза больше. Повышенная упругость (жесткость) плотного вещества ускоряет передачу информации. Вспомним, что скорость звука в воде при нормальных условиях 1,5 км/с, а в металлах 5–7 км/с – заметно быстрее движения атомов и молекул в этих телах.

Детонация распространяется устойчиво и стационарно. Это возможно, только если разрежение, неизбежно возникающее позади волны из-за разлета продуктов взрыва, не может повлиять на зону реакции. Волны разрежения движутся относительно вещества со скоростью звука. Следовательно, зона реакции должна отделяться от последующего течения поверхностью, из которой газ вытекает (в системе отсчета, связанной с фронтом волны) со скоростью звука. Это правило отбора нормальной детонации – стационарного режима – предложено С. Чепменом и Жуге. Скорость детонации должна несколько превышать скорость звука за фронтом, что и наблюдается.

При малых размерах заряда детонация затухает. Критический диаметр для многих ВВ лежит в диапазоне от миллиметров до сантиметров. Боковое расширение ослабляет зону реакции, когда время разлета становится порядка времени химической реакции (критерий Ю.Б. Харитона). Из него следует, что любая горючая смесь может детонировать, если заряд достаточно велик. Действительно, известны неожиданные взрывы материалов, считавшихся инертными. В 1921 году произошел сильнейший взрыв в Оппау (Германия) на заводе удобрений. Произведенная селитра при хра-

Таблица 1

ВВ	Формула	Q , ккал/г	ρ , г/см ³	D , км/с	P , ГПа	T , К
ТНТ	$C_7H_5N_3O_6$	1,0	1,64	7,0	21	3600
Гексоген	$C_3H_6N_6O_6$	1,3	1,8	8,8	34	3900
БТФ	$C_6N_6O_6$	1,4	1,9	8,5	33	5100

нении слеживалась и затвердевала. Рыхление продукта производили взрывами небольших зарядов ВВ. За долгое время было сделано свыше 20 000 взрывов, однако последний из них вызвал детонацию всей кучи. Погибло около 500 человек и примерно 2000 были тяжело ранены.

ПРИМЕНЕНИЯ ВВ

Не будем здесь касаться традиционных областей взрывного дела: разработки месторождений, добычи угля, строительства. В последние десятилетия стали развиваться более сложные технологии, например сварка и обработка материала взрывом. Такая сварка позволяет соединять материалы, которые не свариваются другими способами, например титан и сталь.

Эффект взрывной обработки нередко бывает неожиданным. На рис. 1 показан результат воздействия цилиндрического заряда на толстую медную оболочку. Спереди отрывается довольно аккуратный конус. Схема циркуляции волн в оболочке изображена на рис. 2. Видно, что “в углу” встречаются две волны растяжения, сложение которых и разрывает материал.

Парадоксально тушение пожаров взрывом. Пожар на нефтяной или газовой скважине очень трудно потушить традиционными способами. Оказывается, что эффективен взрыв кольцевого заряда, охватывающего скважину. Всплывающий вихрь (гриб) продуктов взрыва отсекает огонь от топлива на время, достаточное для охлаждения очага горения.

Кумулятивный эффект. Со времен войны все знают слово “фаустпатрон”, весьма эффективное противотанковое средство. Заряд имел на переднем конце коническую выемку с металлической облицовкой (рис. 3) и пробивал броню, считавшуюся абсолютно надежной. Как показали рентгеновские снимки взрыва таких ку-



Рис. 1. Характерное разрушение металлической оболочки заряда. Направление детонации показано стрелкой. На заднем плане для сравнения помещена целая оболочка

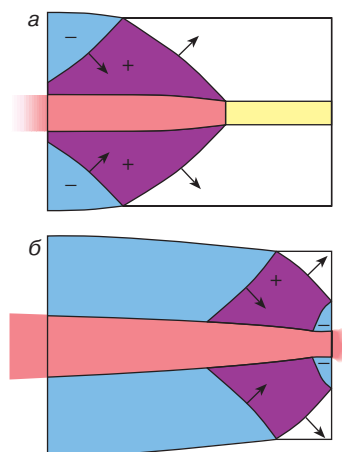


Рис. 2. а – распространение детонации по заряду. В оболочке создается ударная волна, превращающаяся при отражении от свободной поверхности в волну разрежения; б – детонация закончилась. Незадолго до отрыва навстречу движутся две волны разрежения

мулятивных зарядов (В.А. Цукерман, 1943 год), при сжатии конуса вдоль его оси вырывалась высокоскоростная струя металла облицовки. Действие заряда объяснил М.А. Лаврентьев. Давления, развиваемые при взрыве, во много раз превосходят прочность металлов (около 2 тыс. атм для меди). Поэтому материал облицовки ведет себя как жидкость – течет под нагрузкой. Формирование струи жидкости можно наблюдать в домашних условиях. Соедините ладони ребрами под углом около 90° и опустите примерно наполовину в воду. Если развести ладони в стороны и затем быстро их сдвинуть, вверх вырвется плоская струя воды. Точно так же металл облицовки, двигаясь к оси под действием взрыва, порождает тонкую кумулятивную струю со скоростью порядка 10 км/с. Такая струя буквально размывает броню: здесь также работает жидкостный подход.

Вообще кумуляцией называют концентрацию воздействия, усиление его в нужном месте, направлении и пр. Пример кумуляции – сферическое сжатие (имплозия) термоядерного заряда. Атомный плутониевый заряд также приводят в критическое состояние одновре-

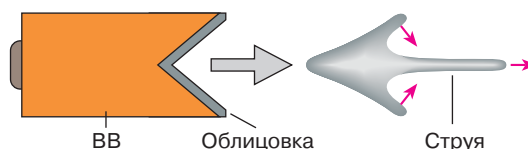


Рис. 3. Схема кумулятивного заряда

менным взрывом окружающих его зарядов обычного ВВ.

Газовая кумуляция применяется для разгона частиц, имитирующих в лабораторных условиях метеориты. Трубочатый заряд ВВ создает на оси скоростной поток газа, который может разогнать металлический шарик до ~10 км/с, не повредив его. На ранней стадии советской космической программы таким образом была оценена метеоритная опасность [1].

Синтез алмаза. Алмаз как фазу высокой плотности получают из графита под давлением. Статическое сжатие применяется с 60-х годов. Поскольку взрыв – это удобный и дешевый генератор высоких давлений, идея сжатия взрывом выглядела заманчивой давно. И действительно, графит в ударной волне переходил в алмаз, но сохранить его долгое время не удавалось. Сильный нагрев на стадии сжатия при разгрузке приводил к графитизации. Поэтому мечта о большом взрыве в угольной шахте с образованием алмазов размером с чемодан не сбылась.

Успешный промышленный синтез осуществлен в американской фирме “Дюпон” (“Du Pont de Nemours”). Графит разбавлялся порошком металла. Такая смесь гораздо менее сжимаема, и при том же давлении нагрев среды был меньше. Кроме того, металл отводил тепло от частиц графита. Толстая металлическая труба набивалась смесью и обжималась взрывом нескольких тонн ВВ (естественно, в условиях полигона). Получались в основном микронные частицы.

Другой способ разработан в Институте химической физики РАН в Черноголовке. В смеси графита с взрывчатым веществом давление детонации воздействовало на углерод непосредственно. Небольшой заряд взрывался в замкнутом объеме.

Но есть и более неожиданный вариант. Большинство ВВ содержат избыток углерода. При взрыве часть его выделяется, как считалось, в виде сажи (графита и аморфного углерода). Но в детонационной волне должна быть стабильной алмазная фаза (рис. 4). Исходя из этих соображений, сотрудники ВНИИ технической физики (Челябинск) еще в 1960-х годах получили взрывные алмазы [2]. Дым и копоть, обычные спутники взрыва, состоят из мельчайших зерен самого драгоценного камня!

Судьба этого открытия оказалась драматичной. Размер алмазов составлял всего несколько нанометров (в отличие от других способов здесь происходит не перестройка уже имеющихся частиц другой фазы, а прямая конденсация из газа продуктов взрыва). Абразивный эффект таких частиц сочли недостаточным. Из-за секретности, окружавшей работы, этот замечательный результат прошел незамеченным.

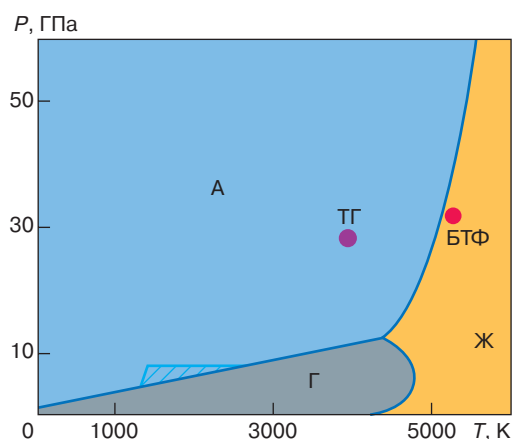


Рис. 4. Фазовая диаграмма углерода. Г – область стабильности графита, А – алмаза, Ж – жидкой фазы углерода. Заштрихована область статического синтеза. Точки – состояния в детонационной волне смеси 50% ТНТ/50% гексогена (ТГ) и БТФ

Вторично конденсация алмаза из собственного углерода ВВ была обнаружена в 1980-х годах [3]. Инициатива работы принадлежит А.М. Ставеру, тогда сотруднику Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева (Новосибирск). Независимо детонационный синтез был обнаружен американскими и немецкими исследователями [4]. Эксперименты показали, что до 10% массы заряда может переходить в ультрадисперсный алмаз. Для очень тонкой обработки такие алмазы годятся, а также они полезны как добавки к маслам, резко уменьшающие трение и износ поверхностей. Смесь тротила и гексогена оказалась удобным сырьем. Каждый взрыв снаряда производит вполне заметное количество алмаза. Предлагалось даже искать искусственные месторождения на полях сражений и местах артиллерийских боев. (Впрочем, эта идея не выглядит реальной, так как на воздухе алмаз сгорает; синтез возможен в инертной среде.)

КИНЕТИЧЕСКИЕ ВЗРЫВЫ

В 1993 году супруги К. и Ю. Шумейкер и Д. Леви открыли комету SL9, захваченную Юпитером несколько десятилетий назад. Комета разрушилась при одном из пролетов вблизи планеты. С 16 по 22 июля 1994 года на Юпитер упало 25 крупных обломков размерами в несколько километров со скоростью около 60 км/с. За падениями следили все земные обсерватории, а также орбитальный телескоп им. Э. Хаббла и космический аппарат “GALILEO” [5].

Места падения находились на невидимой с Земли части Юпитера. Однако через 10–20 мин после ударов вращение планеты выносило эти точки в пределы ви-

димости. Заметим, что собственно удара в нашем земном понимании не происходило. Юпитер не имеет поверхности, в его атмосфере нет границы раздела между твердой и жидкой фазой; приводимый в справочниках радиус планеты условен (он соответствует давлению 1 атм). Поэтому каждое событие было растянуто во времени: осколки тормозились, проходя сотни километров, в конце концов испарялись, порождая ударные волны. Размер области влияния взрывов достигал тысяч километров; следы ударов были заметны в течение недель. Типичный осколок массой около 10 000 т выделял $\sim 10^{22}$ Дж, или несколько миллионов мегатонн.

Возраст известного кратера в Аризоне — тысячи или десятки тысяч лет, то есть он возник уже в присутствии на Земле современного человека. Диаметр кратера 1200 м, глубина 175 м. Минимальная работа для поднятия грунта из такой ямы на уровень почвы порядка $3 \cdot 10^{14}$ Дж. Поскольку только часть энергии взрыва пошла на выброс, вероятная энергия была $3 \cdot 10^{15}$ Дж, или около 1 Мт тротила. Масса метеорита (при второй космической скорости) порядка 50 тыс. т, размер около 20 м. Такой метеорит способен уничтожить крупный город.

Энерговыведение Тунгусского метеорита оценивается в 10 Мт. Возможны падения и километровых объектов с энергией в миллионы раз больше. Сейчас прорабатываются возможности защиты Земли от астероидной опасности.

ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ

Ядро урана находится на грани устойчивости из-за отталкивания протонов. По этой причине уран — последний естественный элемент в Периодической системе. При распаде на примерно одинаковые осколки выделяется энергия их кулоновского взаимодействия, порядка $(Ze/2)^2 / (4\pi\epsilon_0 R)$ ($Z = 92$ — число протонов в ядре, R — его радиус). Эта величина превышает химическую энергию в $Z^2 a / (4R)$ раз. Радиус R на четыре порядка меньше атомного размера a , так что получается коэффициент около $2 \cdot 10^7$, то есть энергия распада примерно 200 МэВ. Отметим, что атомная энергия, как и химическая, в основном электрической природы.

Атом урана на порядок тяжелее молекул продуктов горения нормальных ВВ, и на единицу массы при распаде ядра выделяется примерно в миллион раз больше энергии. Хотя взрывается не весь заряд, но даже при 10%-ной эффективности ядерное ВВ на пять порядков превосходит обычное.

Для взрыва в 1 Мт оценим размер зоны, в которой создается избыточное давление $\Delta P = 1$ атм. Приравняв тепловую энергию ($\approx \Delta P V$) энергии взрыва, получим $V \approx 40 \text{ км}^3$, то есть размер порядка нескольких ки-

лометров. При скачке давления 1 атм в ударной волне разрушается большинство зданий, поэтому полученная величина будет оценкой опасной зоны. Масса воздуха в таком объеме на много порядков больше массы бомбы, так что на этой стадии важна только полная выделившаяся энергия, а не время взрыва и другие детали процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взрыв открывает уникальные возможности достижения экстремально высоких температур, давлений, плотностей. Автор надеется, что изложенные примеры заинтересуют читателя и послужат поводом для более глубокого знакомства с этой увлекательной областью физики.

Сейчас одно из важных направлений — гетерогенная детонация, пример которой — взрыв угольной пыли в шахте. Современные взрывные технологии начались также с гетерогенной системы — динамита, изобретению которого предшествовало трагическое событие. 3 сентября 1864 года в мастерской в Стокгольме произошел взрыв, при котором погибли младший брат А. Нобеля и четверо ассистентов. Нобель не пал духом и продолжил свои работы на барже, стоящей на якоре недалеко от шведской столицы.

Уже почти сто лет (с 1901 года) Нобелевские премии отмечают лучшие научные достижения. Не будем забывать, что институт этих премий основал самый знаменитый взрывник.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мерзиевский Л.А., Титов В.М., Фадеенко Ю.И., Швецов Г.А. Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 77–91.
2. Волков К.В., Даниленко В.В., Елин В.И. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ // Там же. 1990. Т. 26, № 3. С. 123–125.
3. Лямкин А.И., Петров Е.А., Ершов А.П. и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ // ДАН СССР. 1988. Т. 302, № 3. С. 611–613.
4. Greiner N.Roy, Phillips D.S., Johnson J.D., Volk F. Diamonds in Detonation Soot // Nature. 1988. Vol. 333. P. 440–442.
5. Фортвов В.Е., Гнедин Ю.Н., Иванов С.В. и др. Столкновение кометы Шумейкеров–Леви-9 с Юпитером: Что мы увидели // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 4. С. 391–422.

* * *

Александр Петрович Ершов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики СУНЦ Новосибирского государственного университета, ведущий научный сотрудник Института гидродинамики СО РАН. Область научных интересов — физика взрыва. Автор более 50 научных работ и трех учебников по физике.