

Г. И. Покровский.

профессор,
доктор технических наук

УСПЕХИ ГАЗОДИНАМИКИ

(ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА ВЫСОКИХ
ДАВЛЕНИЙ)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва 1974

Покровский, Георгий Иосифович.

П48 Успехи газодинамики. М., «Знание», 1974.
64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Физика», 2. Издается ежемесячно с 1947 г.).

Брошюра знакомит читателей с явлениями, возникающими при различных формах движения газов, имеющих высокое давление и температуру. Описаны достижения в исследовании ряда газодинамических процессов, представляющих теоретический и практический интерес в областях взрывной техники, в астрофизике и физике плазмы.

Брошюра рассчитана на специалистов, а также на широкий круг читателей, интересующихся новыми проблемами физики и техники.

20403

532

Т. п. 1974 г., № 62

СОДЕРЖАНИЕ

Всякий взрыв — направленный	3
При очень высоких давлениях все вещества — газы	6
Направленное расширение взрывных газов	8
Слой Харитона	14
Отношение теплоемкостей во взрывных газах	16
Простой и наглядный способ определения постоянной K для взрывных газов	19
Угловой заряд	21
Фокусирование энергии взрывных газов при помощи логарифмической спирали	22
Зоны действия взрывных газов прямоугольных зарядов	26
Встречное инициирование	29
Коническая ударная труба — концентратор энергии	31
Глобальные и космические ударные трубы	32
Атмосфера — ускоритель элементарных частиц	36
Генераторы газовых потоков и ударных волн	38
Средства гашения газовых потоков и ударных волн	41
Газовые потоки кинжального действия	43
Вакуумные камеры	46
Детонационные вентили	47
Взрыв как двигатель	49
Электрогазодинамические явления	52
Физико-химические процессы при взрыве	53
Электрический взрыв	55
Взрыв при ударе	57
Взрывающийся воздух	61
Заключение	64

ВСЯКИЙ ВЗРЫВ — НАПРАВЛЕННЫЙ

В технике широко известно применение взрывчатых веществ для выполнения различных работ, среди которых пока на первом месте можно поставить дробление горных пород и других прочных материалов. Каждому современному человеку также хорошо известно разрушающее действие взрыва снарядов и бомб, применяемых в войнах различного масштаба. На основании общей осведомленности о таких взрывах каждый современный человек представляет себе взрыв как весьма быстрое превращение заряда взрывчатого вещества в газы, имеющие очень высокую температуру (тысячи градусов Цельсия) и очень высокое давление (сотни тысяч атмосфер). Так как давление взрывных газов существенно больше, чем давление окружающей среды или давление, которое могут выдержать окружающие место взрыва предметы, то газы, расширяясь, преодолевают все преграды и производят вокруг места взрыва значительные разрушения.

Такое представление о типичных проявлениях движения, возникающего в результате взрыва, в целом правильно, но при этом остается незамеченной одна небольшая, но удивительная деталь.

Представим себе, что взрываемый заряд изготовлен в форме конуса. Взрыв этого заряда осуществляется при помощи электродетонатора, расположенного в рассматриваемом нами случае в вершине конического заряда.

Электродетонатор представляет собой небольшой заряд взрывчатого вещества повышенной чувствительности. В этом заряде находится тонкая проволока,

включенная в электрическую цепь. При пропускании электрического тока проволочка быстро нагревается до высокой температуры и вызывает взрыв взрывчатого вещества электродетонатора. Этот взрыв действует на основной заряд и вызывает его взрыв.

Казалось бы, что в рассмотренной обстановке взрыв конического заряда должен привести к полному разрушению любых непрочных объектов, расположенных около места взрыва. Однако на самом деле это не так. Чтобы убедиться в этом, окружим заряд кольцом, в котором имеются отверстия. В эти отверстия можно вставить медные или алюминиевые проволочки, расположенные параллельно оси кольца.

При взрыве расширяющиеся взрывные газы будут со значительной силой действовать на эти проволочки и отогнут их на более или менее значительные углы в направлении своего движения. Таким образом, по углу отгиба проволочек можно составить представление об интенсивности действия взрыва по тому или иному направлению.

Такой примитивный эксперимент открывает удивительные обстоятельства. Оказывается, что не все проволочки отгибаются одинаково. Более того, некоторые проволочки не отгибаются вовсе. Они остаются не деформированными и не закопченными действием взрывных газов. Создается впечатление, будто бы взрыв на них совсем не действовал. Это указывает на существование вблизи заряда некоторых областей, в которые взрывные газы по какой-то причине не проникают, хотя на их пути нет никаких препятствий, которые могли бы задержать их свободное расширение.

Прежде всего можно заметить, что никакого действия взрыва нет в довольно широкой полосе вокруг оси заряда со стороны вершины конуса, где расположен электродетонатор. Эту зону можно назвать условно «хвостовой зоной». Здесь, почти в пределах полусферы, нельзя обнаружить существенных следов действия взрыва. Кроме этого, зоны существенного ослабления действия взрыва обнаруживаются в кольцевой зоне, примыкающей к основанию конуса.

Особенно удивительным можно считать то, что эти области, где нет действия взрыва, примыкают непосредственно к самому заряду.

Если удалиться от заряда на расстояние, в несколько раз превышающее его размеры, то явление снижения действия взрыва существенно ослабевает, а на еще более значительных расстояниях практически исчезнет совсем.

Рассмотренный опыт можно повторить, взрывая заряд, имеющий форму шара. В этом случае сам заряд не имеет выступающих вершин и ребер. Поэтому можно было бы предположить, что действие его по всем направлениям должно быть одинаковым. Действительно такое одинаковое действие по всем направлениям обнаруживается, если электродетонатор поместить в центре шарового заряда.

Если же электродетонатор расположить на поверхности шара, то возникает зона пониженного действия взрыва вблизи места, где расположен электродетонатор.

Рассмотренные примеры показывают, что движение газов в условиях высоких давлений имеет некоторые необычные, нетривиальные особенности, которые проявляются неожиданным образом и могут при первом знакомстве показаться противоестественными и неубедительными.

Те простые примеры со взрывом зарядов разной формы, которые рассмотрены выше, конечно, не исчерпывают всех интересных и характерных явлений газовой динамики высоких давлений. Эти примеры приведены только для того, чтобы показать, что в газовой динамике можно найти такие процессы, которые вовсе не являются самоочевидными. Однако именно более глубокое рассмотрение таких процессов позволяет вскрыть характерные особенности газовой динамики высоких давлений, которые наряду с общим познавательным значением играют также существенную роль в практике строительства и промышленности.

Впрочем, было бы неправильным считать, что газовая динамика высоких давлений сводится только к узкоспециальным прикладным задачам. Можно считать несомненным то, что развитие всей человеческой техники направлено в сторону дальнейшего совершенствования различных способов повышения концентрации энергии и силы. Это с неотвратимой закономерностью приводит к увеличению числа проблем, связанных с сверхвысокими скоростями, давлениями и температурами. Все чаще

и чаще встречаются процессы, при которых невозможно ограничиться использованием элементов приборов и машин, изготовленных из твердого материала и имеющих жесткую, неизменную форму. Можно без преувеличения утверждать, что дальнейший прогресс техники невозможен без расширения человеческих знаний в области газовой динамики высоких энергий.

Совершенно так же расширение исследований Вселенной ставит все более грандиозные задачи, связанные с газами весьма высоких энергий, давлений и скоростей. В основе грандиозных процессов, протекающих в квазарах, возникающих при взаимодействии космических масс и порождающих стремительно перемещающиеся и строго направленные газовые струи, лежат законы газодинамики высоких давлений.

ПРИ ОЧЕНЬ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ВСЕ ВЕЩЕСТВА — ГАЗЫ

При изучении механических свойств различных веществ можно выделить, как известно, три агрегатных состояния — твердое, жидкое, газообразное. При твердом состоянии сцепление частиц столь велико, что эти частицы сохраняют определенное положение друг относительно друга, несмотря на действие силы тяжести и других сил, стремящихся сместить эти частицы. Вследствие этого твердое тело имеет определенную форму и определенный объем и в той или иной мере обладает упругостью. Это значит, что при воздействии тех или иных сил на твердое тело его частицы могут в некоторой небольшой степени сместиться друг относительно друга. Однако они как бы «сохраняют воспоминание» о своем первоначальном положении и при исчезновении деформирующих сил возвращаются в это положение. При этом можно выделить упругость формы, т. е. способность восстанавливать первоначальную форму, и упругость объема, т. е. способность восстанавливать первоначальный объем (или плотность).

В жидком состоянии частицы вещества могут сравнительно свободно перемещаться друг около друга, однако расстояния между частицами сохраняются, подчиняясь закону объемной упругости. В результате этого

определенная масса жидкости может иметь любую форму, но определенный и неизменный объем. Впрочем, этот объем так же, как и размеры твердых тел, в небольшой мере зависит от температуры, как правило, немного увеличиваясь при нагревании. Однако это явление выражено сравнительно слабо и не имеет значения для тех процессов, которые рассматриваются дальше.

Газообразное состояние характеризуется, как известно, тем, что расстояния между частицами вещества и их взаимное расположение не являются постоянными. В зависимости от температуры и давления объем газа изменяется. При этом основное противодействие, которое газ оказывает внешнему давлению, обусловливается бомбардировкой, производимой движущимися частицами газа — молекулами и атомами при сравнительно низких температурах.

Отличия твердого, жидкого и газообразного состояния веществ не являются абсолютными отличиями. Если давление, действующее на вещество, неограниченно возрастает, то силы связи между частицами, определяющие их взаимное расположение, оказываются незначительными в сравнении с этим давлением. При этом вещество теряет свойства твердого тела. Оно приобретает способность течь и деформироваться подобно жидкости. При дальнейшем нарастании давления, помимо текучести, возникает и столь значительная сжимаемость, которая соответствует газообразному состоянию.

Можно считать, что твердые и жидкие тела — это те же газы, сжатые, помимо внешних сил, еще и очень большими силами молекулярного притяжения. Давление молекулярного притяжения имеет величину порядка десятков и сотен тысяч килограммов на каждый квадратный сантиметр. Если внешние давления существенно меньше этой величины, то вещество находится в твердом состоянии. Если внешнее давление совпадает по порядку величины с давлением молекулярного притяжения, то вещество можно считать жидким. Если же внешнее давление существенно больше молекулярного, то любое вещество следует считать газом.

Совершенно ясно, что при очень высоких давлениях не может существовать какого-либо сосуда, емкости или трубы, которые заключали бы газ, потому что нет

материала, из которого можно было бы изготовить такие устройства.

В земных условиях, когда нет внешних сил, способных противостоять гигантским давлениям порядка сотен тысяч килограммов на квадратный сантиметр, газы сверхвысоких давлений могут существовать только весьма малое время, находясь в состоянии столь сильного и быстропеременного движения, что инерция движущихся масс заменяет статическую прочность емкостей, содержащих газ.

Таким образом, все дальнейшие явления, связанные с веществом при сверхвысоких давлениях, представляют собой весьма интенсивные динамические процессы, протекающие в ничтожные промежутки времени.

Сказанное, однако, не означает, что невозможны статические состояния, характеризующиеся сверхвысокими давлениями. Такие состояния возможны, например, на большой глубине внутри крупных небесных тел, где сила тяжести создает давление порядка десятков, сотен тысяч и более килограммов на квадратный сантиметр.

Человеку пока недоступны эти глубокие недра космических тел (в частности, даже Земли). По-видимому, проникновение в эти области неизмеримо труднее, чем осуществление космических полетов. Естественно, что при таких условиях у нас остается только один путь изучения вещества при сверхвысоких давлениях — путь быстрых динамических процессов, где противодействие гигантским давлениям обусловлено гигантскими силами инерции. Другими словами, мы должны производить реальные или мысленные эксперименты с веществом, заключенным внутри микросекундной «динамической емкости».

НАПРАВЛЕННОЕ РАСШИРЕНИЕ ВЗРЫВНЫХ ГАЗОВ

Как правило, всякий взрыв является направленным. Это значит, что действие взрыва распределено в пространстве неравномерно и эта неравномерность подчиняется определенным законам.

Таким образом, существенной проблемой в области динамики газов высоких давлений следует считать оп-

ределение физических и геометрических законов направленного переноса энергии при расширении продуктов взрыва. Эти законы удобнее всего начать изучать в простейших условиях.

Рассмотрим взрыв линейного заряда, имеющего форму цилиндра, длина которого велика по сравнению с его диаметром. У этого заряда детонатор, вызывающий детонацию взрывчатого вещества, расположен на одном из концов. После действия этого детонатора в заряде возникает волна детонации, распространяющаяся вдоль заряда с очень большой скоростью (несколько километров в секунду). Волна детонации представляет резкий скачок давления и температуры, приводящий к весьма быстрому превращению взрывчатого вещества во взрывные газы. При этом выделяется значительная энергия, температура и давление во взрывных газах резко возрастают и эти газы начинают расширяться с большой скоростью.

Явление детонации взрывчатого вещества можно считать своеобразным и необычным с точки зрения привычных представлений большинства современных людей. Для облегчения его анализа можно изыскать тот или иной прием, который позволил бы изучаемое явление представить в такой форме, которая оказывается достаточно привычной, понятной, простой.

В нашем случае соответствующий прием при всей его простоте требует некоторой инициативы и фантазии. Необходимо представить себе, что волна детонации остановилась, что фронт этой волны неподвижен. Этого можно достигнуть двумя путями. Во-первых, можно представить себе, что наблюдатель движется вдоль заряда с такой же скоростью, с какой перемещается фронт волны детонации. Во-вторых, можно представить себе, что удлинённый заряд движется навстречу фронту волны детонации со скоростью, равной по величине скорости распространения этой волны, но имеет обратное направление.

Скорость распространения волны детонации во взрывчатых веществах, применяемых в современных условиях, равна, как известно, нескольким километрам в секунду. Пока мы еще не имеем технической возможности перемещать удлинённый заряд взрывчатого вещества с такой скоростью. Однако это ни в какой мере

не препятствует мысленному эксперименту, когда такая скорость достигнута.

Итак, если удлинённый заряд подается навстречу волне детонации, то место, где происходит детонация, становится неподвижным. Неподвижный фронт волны детонации оказывается границей между невзорвавшимся взрывчатым веществом и взрывными газами высокого давления.

Взрывчатое вещество отличается от взрывных газов тем, что частицы взрывчатого вещества связаны молекулярными силами. Если мысленно эти силы заменить внешним статическим давлением, то можно считать, что взрывчатое вещество представляет собой газ, находящийся в весьма прочной трубе, выдерживающей без разрушения и деформации давление газа.

Так как мы приняли, что удлинённый заряд движется со скоростью детонации навстречу волне детонации, то мы можем такой движущийся заряд заменить газом высокого давления, подаваемым по прочной трубе со скоростью детонации. В том месте, где расположен фронт волны детонации, взрывчатое вещество преобразуется во взрывные газы высокого давления. Это соответствует исчезновению на фронте волны детонации молекулярных сил, сдерживающих частицы взрывчатого вещества. Это значит, что там, где расположен фронт волны детонации, стенки трубы кончаются; в этом месте труба обрезана. Газ высокого давления, подаваемый по трубе, вырывается через конец трубы в свободное пространство, где он может расширяться, не встречая (в первом приближении) никакого сопротивления.

Если представить себе такое истечение газа высокого давления из конца трубы, то нетрудно сделать вывод о том, что выходящий в свободное пространство поток будет веерообразно расширяться. Линии движения частиц газа, идущие параллельно друг другу внутри трубы, начинают расходиться, удаляясь друг от друга и заполняя веерообразным потоком некоторый телесный угол.

Если выделить несколько частиц газа, двигавшихся внутри трубы и располагавшихся на каком-либо одном диаметре потока, то после выхода из трубы эти частицы начнут удаляться друг от друга (вследствие расшире-

ния газа) и через соответствующий промежуток времени будут расположены вдоль дуги. С некоторым приближением эту дугу можно считать дугой окружности с центром, расположенным в центре отверстия трубы.

Если считать, что зона расширения велика по сравнению с диаметром, то векторы, веерообразно расходящиеся из центра отверстия трубы, представляют собой скорости движения частиц взрывных газов, вырывающихся из трубы.

Теперь перейдем от нашей фантастической картины движущегося удлиненного заряда к реальному неподвижному заряду. Чтобы определить, как будут двигаться взрывные газы в этом случае, произведем векторное вычитание из скоростей частиц взрывных газов скорости, с которой подавался заряд навстречу детонации. При этом мы получим векторную диаграмму, ограниченную дугой с двумя хордами. Учитывая то, что взрывается неподвижный заряд, на который не действует никакая внешняя сила, мы должны считать, что центр массы расширяющихся газов остается неподвижным. Отсюда следует, что сумма всех векторов, составляющих полученную диаграмму, должна быть равна нулю. Это значит, что векторы, составляющие хорды полученной фигуры, должны быть наклонены в ту сторону, куда распространяется детонация. Эти векторы соответствуют скоростям расширения взрывных газов, вышедших из внешней, периферической части цилиндрического заряда.

Векторы же, соответствующие средней части дуговой диаграммы, должны быть направлены против направления распространения детонации. Эти векторы по своей величине существенно уступают векторам, характеризующим расширение газов, возникших в периферийной части заряда (рис. 1).

Из всего рассмотренного нами построения вытекают простые и фундаментальные выводы.

Во-первых, можно установить, что газы, движущиеся с очень большими скоростями, несущие основную часть энергии и способные произвести наиболее сильные действия, составляют небольшую часть всех взрывных газов.

Во-вторых, газы, переносящие максимально концентрированную энергию, движутся в определенных, доста-

точно узких секторах, чем определяется направленное действие взрыва.

В-третьих, газы, переносящие максимально концентрированную энергию, выбрасываются из периферийной части заряда. Их энергия определяется не только энергией взрывчатого вещества, находящегося в месте расположения данной части заряда, но и энергией, пере-

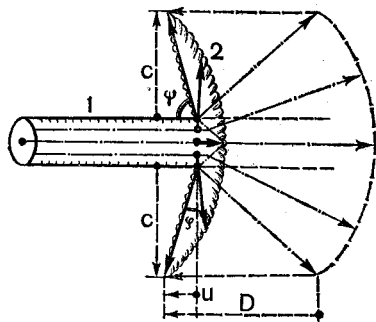


Рис. 1. Схема расширения взрывных газов удлиненного заряда. Детонация распространяется справа налево.

D — скорость распространения детонации; c — скорость звука во взрывных газах; u — скорость взрывных газов за фронтом волны детонации; 1 — контур невзорвавшейся части заряда; 2 — контур облака взрывных газов.

данной в периферийную часть заряда из его внутренних частей в процессе ускорения газов после детонации.

Таким образом, для того чтобы иметь суждение о том, каково направленное действие взрыва любого заряда, любой формы и при любом расположении детонатора, необходимо и достаточно (по крайней мере при приближенном решении задачи) определить характер движения взрывных газов, возникающих в поверхностном слое заряда. При этом движение таких газов можно представить с помощью достаточно простой и определенной схемы.

Прежде всего следует учесть, что волна детонации распространяется по прямой линии к любой точке поверхности от места, где расположен детонатор. Исключение может быть только в том случае, если в заряде имеются выемки, которые волна детонации должна огибать. Кроме этого, направление распространения детонации может подвергнуться преломлению, если заряд состоит из различных взрывчатых веществ с различными скоростями распространения детонации. Эти слож-

ные случаи целесообразно рассмотреть дальше. Итак, кроме указанных особых случаев, обычно детонационная волна движется в заряде прямолинейно от детонатора к любой точке поверхности.

При прохождении волны детонации возникающие взрывные газы получают определенную скорость в направлении распространения детонации. Скорость движения газов за фронтом волны детонаций составляет определенную часть скорости распространения самой детонации.

Дальше мы рассмотрим подробнее этот вопрос. Пока же примем, что на основании экспериментов и теоретических расчетов скорость газов за фронтом волны детонации равна четверти скорости распространения детонации.

Когда волна детонации достигает поверхности заряда, то образовавшиеся взрывные газы устремляются в свободное пространство и приобретают при этом дополнительную скорость, равную скорости звука в этих газах. Эта скорость при определенных условиях составляет (как это будет рассмотрено дальше более подробно) три четверти от скорости детонации и направлена перпендикулярно к поверхности заряда.

Обе эти составляющие скорости расширения взрывных газов складываются друг с другом по общеизвестным правилам сложения векторов.

Если, например, волна детонации подходит к поверхности изнутри заряда по направлению, перпендикулярному к этой поверхности, то скорость, полученная взрывными газами, складывается со скоростью расширения этих газов в свободное пространство и дает при этом суммарную скорость движения газов, которая оказывается равной скорости детонации.

Если же волна детонации идет вдоль поверхности заряда, то скорость расширения взрывных газов составит величину, равную

$$v = D\sqrt{0,25^2 + 0,75^2} = 0,79D.$$

Здесь D скорость распространения детонации. При этом направление расширения газов будет отклонено от нормали к поверхности заряда (в сторону распростра-

нения детонации) на угол φ , определяемый формулой

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{0,25}{0,75} = \frac{1}{3}; \varphi \approx 16^\circ,7.$$

Исходя из этих простых соображений, можно определить направления расширения взрывных газов в случае взрыва зарядов, имеющих различную форму при их взрыве детонаторами, расположенными в любом заданном месте. Это показано на рис. 1.

СЛОЙ ХАРИТОНА

Действие взрывных газов удлиненного заряда очень легко проверить на простейшем эксперименте. Этот эксперимент состоит в следующем. На достаточно прочную броневую плиту, способную, не разрушаясь, выдержать действие взрыва, кладут удлиненный заряд и взрывают его с одного конца.

После взрыва действие взрывных газов можно видеть на броневой плите в виде удлиненной вмятины, оставленной на месте, где был заряд. Кроме того, по краям вмятины на металле остаются следы взрывных газов, двигавшихся вдоль поверхности. Эти следы имеют вид продольных полос или царапин, направление которых позволяет довольно точно установить направление движения той части взрывных газов, которая несла на себе основную энергию взрыва.

Если взрываются довольно крупные заряды (диаметром в несколько сантиметров), то угол отклонения направления движения газов от оси заряда φ оказывается точно соответствующим приведенному выше расчету для любого взрывчатого вещества нормальной мощности, например для тротила (тринитротолуола).

Однако если уменьшать диаметр заряда, то картина изменяется — угол φ увеличивается и постепенно приближается к 90° . Вместе с тем при уменьшении диаметра заряда можно дойти до такого критического предела, когда распространение детонации в нем становится невозможным и взрыв затухает, не дойдя до конца заряда. Именно приближение к этому критическому минимальному диаметру удлиненного заряда связано с приближением угла φ к 90° .

Рассмотрим причины, которые вызывают эти явления, не сразу привлекающие внимание, но имеющие существенное, принципиальное значение для понимания физики взрыва.

Когда волна детонации доходит до свободной поверхности заряда, давление во взрывчатом веществе резко возрастает. Это приводит к сильному нагреванию заряда и быстрому развитию реакции, при которой взрывчатое вещество превращается во взрывные газы. Вместе с тем немедленно начинается расширение взрывных газов в свободное пространство. Вследствие этого внутри массы взрывных газов быстро распространяется волна разрежения. Эта волна снимает высокое давление и приводит к быстрому снижению температуры.

Таким образом, время действия высокого давления и высокой температуры оказывается ограниченным. Чем ближе к свободной поверхности заряда находится рассматриваемый нами слой взрывчатого вещества, тем короче время действия на него высокого давления и высокой температуры. Это значит, что и время превращения взрывчатого вещества во взрывные газы тем меньше, чем ближе находится слой к поверхности заряда.

Превращение взрывчатого вещества во взрывные газы представляет собой химическую реакцию, которая протекает весьма быстро. Однако необходимое для этой реакции время все же не равно нулю.

Если размеры заряда велики по сравнению с этим поверхностным слоем, то его наличие практически не меняет характера движения взрывных газов. Если же размеры заряда становятся соизмеримыми со слоем неполной детонации, то скорость движения взрывных газов уменьшается и угол φ становится несколько меньше ($\varphi \approx 14^\circ$).

Наличие не полностью детонирующего слоя на поверхности заряда приводит к тому, что удлиненные заряды очень малого диаметра или сосредоточенные заряды очень малых размеров вообще не могут детонировать.

Впервые на особенности недетонирующего слоя на поверхности заряда обратил внимание академик Ю. Б. Харитон и сделал на этой основе ряд принципиально важных выводов. В современной науке о взры-

ве недетонирующий слой взрывчатого вещества принято называть слоем Харитона.

Для вопроса рассматриваемого нами о направленном действии взрывных газов слой Харитона имеет прежде всего значение потому, что позволяет согласовать теоретические и опытные значения углов φ .

ОТНОШЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВО ВЗРЫВНЫХ ГАЗАХ

Как всякое вещество, взрывные газы имеют некоторую теплоемкость. Теплоемкостью, как известно, называют количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы данного вещества на один градус. Единицей массы может быть при этом грамм, килограмм и т. д., а также грамм-молекула и т. д. Теплоемкость у газа может быть различной. В частности, можно выделить два значения теплоемкости — при постоянном объеме и при постоянном давлении. Если объем постоянен, то при нагревании газа энергия затрачивается только на увеличение скорости движения частиц газа.

Если же нагревание происходит при постоянном давлении, то газ расширяется и затрачивает дополнительную работу на преодоление сопротивления окружающей среды. Поэтому теплоемкость газа при постоянном давлении всегда больше теплоемкости при постоянном объеме.

Гидродинамическая теория детонации, описывающая рассмотренные явления движения волны детонации во взрывчатых веществах, позволяет связать рассмотренные скорости детонации D , скорости взрывных газов за фронтом волны детонации u , скорости разлета v с величиной K , являющейся отношением теплоемкостей взрывных газов.

Именно

$$u = \frac{D}{K+1};$$
$$v = D \sqrt{\left(\frac{1}{K+1}\right)^2 + \left(1 - \frac{1}{K+1}\right)^2}.$$

Кроме того, скорость расширения в свободное пространство (без учета скорости U) равна

$$C = \frac{KD}{K+1}.$$

Значения всех этих скоростей согласуются с данными эксперимента, если допустить, что $K = 3$.

Это допущение требует детального анализа и экспериментального подтверждения.

Если газ нагревается при постоянном объеме и энергия затрачивается только на увеличение скорости молекул, то значение теплоемкости зависит от строения молекул газа. Если это молекулы одноатомные, основная масса которых сосредоточена в весьма малом по размеру атомном ядре, то их энергия вращения может считаться практически равной нулю. При таких условиях молекулы могут накапливать энергию только в форме поступательного движения по трем взаимно перпендикулярным направлениям. В связи с этим принято говорить, что молекулы одноатомного газа имеют три степени свободы.

При нагревании одноатомного газа энергия распределяется равномерно по трем степеням свободы и теплоемкость определяется числом этих степеней. Более того, если отнести теплоту к массе вещества, равной одной граммолекуле, т. е. к массе, равной числу граммов данного вещества, соответствующего сумме атомных весов веществ, входящих в состав данной молекулы, то для одноатомных газов теплоемкость окажется равной 3 калориям. Это значит, что случайно численное значение граммолекулярной теплоемкости совпало с числом степеней свободы движения молекул.

Если мы перейдем к двухатомному газу, в молекуле которого есть два атомных ядра, то сможем установить, что, кроме трех степеней свободы поступательного движения, появились еще две степени свободы вращения около двух взаимно перпендикулярных осей, каждая из которых, в свою очередь, перпендикулярна линии, соединяющей центры атомных ядер в молекуле. Таким образом, у двухмолекулярных газов в целом имеется 5 степеней свободы. В соответствии с этим теплоемкость двухатомного газа оказывается равной 5 калориям на граммолекулу.

Если имеется молекула, содержащая три или более атомов, то она способна, как правило, накапливать энергию (помимо поступательного движения) при вращении около трех взаимно перпендикулярных осей. В соответствии с этим граммолекулярная теплоемкость веществ, у которых в состав молекулы входят три и более атома, должна быть равна 6 калориям на граммолекулу.

Обозначим число степеней свободы движения молекул в общем случае через i . Тогда можно написать для граммолекулярной теплоемкости газа при постоянном объеме C_v такое равенство

$$C_v = i.$$

Расчеты показывают, что при определении граммолекулярной теплоемкости газа при постоянном давлении, которую обозначим C_p , необходимо дополнительное количество теплоты для выполнения работы расширения. Это дополнительное количество теплоты оказывается равным 2 калориям. Поэтому можно написать

$$C_p = i + 2.$$

Исходя из полученных значений C_p и C_v , можно определить величину

$$K = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} = 1 + \frac{2}{i}.$$

Выше было указано, что исходя из данных экспериментов, для взрывных газов $K = 3$.

Вставляя эту величину в предыдущее соотношение, получаем $1 + \frac{2}{i} = 3$.

Отсюда следует неожиданный результат $i = 1$.

Другими словами, это значит, что у молекул взрывных газов имеется только одна степень свободы независимо от их атомного состава. Такой вывод кажется не только неожиданным и парадоксальным, но и физически бессмысленным.

Можно предложить объяснение, которое не следует понимать как исчерпывающее раскрытие существа дела, а скорее как простейшую схему состояния взрывных газов. Дело в том, что движение взрывных газов проте-

кает настолько быстро, что оно не успевает равномерно распределиться по всем возможным степеням свободы. Поэтому число этих степеней уменьшается и при очень большой скорости процесса остается только одна-единственная степень.

Это обстоятельство представляет особый интерес потому, что при более длительных процессах в газах с высокими температурами значение K оказывается существенно меньше трех. Это обусловлено тем, что при повышении температуры в сильно нагретом газе энергия расходуется не только на движение по различным направлениям, но и на ионизацию, т. е. на отрыв электронов от атомов.

ПРОСТОЙ И НАГЛЯДНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ K ДЛЯ ВЗРЫВНЫХ ГАЗОВ

Мы уже знаем, что значение $K = 3$ соответствует различным экспериментам с взрывчатыми веществами. Однако существенное принципиальное значение этой величины и неожиданные выводы, которые можно сделать исходя из значения этой константы приводят к необходимости выработки возможно более убедительного и наглядного способа определения постоянной K .

С этой целью в 1945 г. К. П. Станюковичем и автором этой брошюры был предложен следующий способ.

Из исследуемого взрывчатого вещества изготавлиется заряд в форме тонкого кольца, которое помещается на броневой плите, покрытой (для удобства регистрации действия взрыва) сравнительно тонким алюминиевым листом.

Инициирование взрыва производится электродетонатором в каком-либо месте кольцевого заряда. Волна детонации распространяется вдоль кольца, и взрывные газы расширяются, двигаясь как наружу от него, так и внутрь. Газы,двигающиеся наружу, особого значения не имеют. В отличие от них газы, расширяющиеся внутрь кольца, оставляют интересный след на алюминиевом листе. На этом листе отпечатывается весьма интенсивно контур взорвавшегося кольцевого заряда.

Однако кроме этого отпечатка образуется еще одно кольцо меньшего радиуса, отпечатанное на алюминии также резко и четко. Это второе кольцо возникает в результате взаимного наложения струй взрывных газов, несущих основную энергию взрыва.

На основании простого геометрического построения, показанного на рис. 2, можно установить следующее

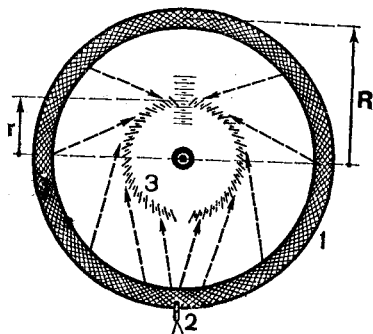


Рис. 2. Схема опыта по определению отношения теплоемкостей взрывных газов.

1 — кольцевой заряд; 2 — детонатор; 3 — зона усиленного действия взрывных газов; R — радиус кольцевого заряда; r — радиус зоны усиленного действия взрывных газов.

соотношение между радиусом кольцевого заряда R и радиусом кольца, созданного газовыми потоками r :

$$\frac{R}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} = \frac{C}{u} \approx K.$$

Можно с точностью до нескольких процентов принять приближенно

$$\frac{R}{r} = K.$$

Опыты, проведенные с описанной установкой, привели к заключению, что K достаточно близко к значению 3, соответствовавшему различным другим экспериментам.

Здесь уместно отметить, что еще до проведения каких-либо точных измерений в 1944 г. Л. Д. Ландау и К. П. Станюкович на основе общих теоретических соображений высказали предположение, что $K=3$. Любопытно отметить, что газодинамические соотношения, характеризующие процесс детонации, приобретают особую простоту и математическое изящество при $K=3$.

УГЛОВОЙ ЗАРЯД

Направленное действие расширяющихся взрывных газов весьма ярко и своеобразно проявляется, если происходит взрыв удлиненного заряда, имеющего некоторый излом под тем или иным углом, например, под прямым.

Чтобы обеспечить устойчивое распространение детонации по такому заряду (если он имеет сравнительно небольшой радиус), на месте излома заряда целесообразно поместить массивное стальное зеркало, поставленное таким образом, чтобы отражение волны детонации осуществилось подобно отражению светового или звукового луча.

Заряд такой формы можно поместить на броневой плите, подложив под заряд алюминиевый лист, как и при описанном выше опыте с кольцевым зарядом. При взрыве этого заряда он отпечатывается на алюминиевом листе. Кроме этого, отпечатывается также на листе линия, идущая от вершины углового заряда и отклоняющаяся в сторону от биссектрисы угла в сторону распространения волны детонации. Эта линия возникает там, где соударяются потоки взрывных газов. При взаимодействии газовых потоков происходит резкое снижение скорости их движения. Кинетическая энергия движения переходит при этом в энергию сжатия газов. Давление резко возрастает. Возрастает также и температура заторможенных газов. Воздействие высокого давления и температуры оставляет на алюминиевом листе резко очерченную полосу. Это позволяет достаточно определенно установить угол между этой полоской и биссектрисой угла излома заряда. При этом можно установить, что этот угол с довольно высокой точностью соответствует углу φ , который был определен выше и равен $16^{\circ},7$ (рис. 3).

Результат эксперимента изменяется, если детонация начинается от вершины угла. В этом случае линия соударения газов совпадает с биссектрисой угла.

Если произвести эксперимент с линейным зарядом, представляющим собой периметр многоугольника, то внутри этого многоугольника образуется система лучей. Если многоугольники имеют равные углы и стороны, то лучи, возникающие при взрыве, пересекаются в одной

точке. В этой точке происходит своеобразное фокусирование энергии расширяющихся взрывных газов. Однако такое фокусирование не является наиболее сильной формой концентрации энергии взрывных газов в одной точке или вдоль определенной линии (перпендикулярной

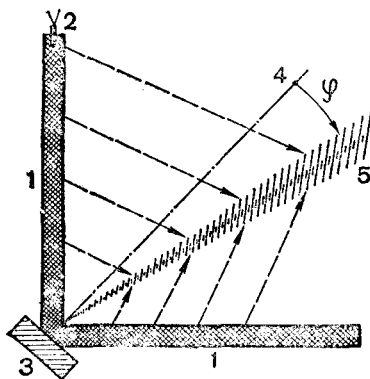


Рис. 3. Действие взрывных газов углового заряда.
 1 — угловой заряд; 2 — детонатор; 3 — стальное зеркало детонационной волны; 4 — биссектриса; 5 — зона соударения потоков взрывных газов

плоскости, в которой расположен заряд). Это обусловлено тем, что значительная часть энергии взрывных газов распределяется вдоль взаимно пересекающихся лучей.

ФОКУСИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВНЫХ ГАЗОВ ПРИ ПОМОЩИ ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ СПИРАЛИ

Наиболее совершенный способ фокусирования взрывных газов получается тогда, когда оказывается возможным свести в одной точке плоскости, в которой расположен заряд, возможно большее число линий расширения взрывных газов. Этого можно достигнуть, располагая заряд так, чтобы все потоки расширяющихся взрывных газов, движущиеся под углом, равным $\psi = 73^{\circ},3$ к оси заряда, сходились бы в одной точке.

Если принять полярную систему координат, то этому требованию будет удовлетворять линейный заряд, изогнутый по линии, называемой логарифмической спи-

рально. Уравнение такой спирали имеет вид

$$R_\alpha = R_0 e^{-(\operatorname{tg}\psi) \cdot \alpha}$$

Здесь R_α радиус спирали, отклоненный на угол α от начальной линии (рис. 4); R_0 соответствует $\alpha = 0$. Заряд, удовлетворяющий рассмотренным требованиям, следует выполнить в форме двух ветвей логарифмической спирали, из которых одна соответствует углам $0 \leq \alpha \leq \pi$, откладываемым влево от линии R_0 , а другая — углам α , меняющимся в тех же пределах, но откладываемым

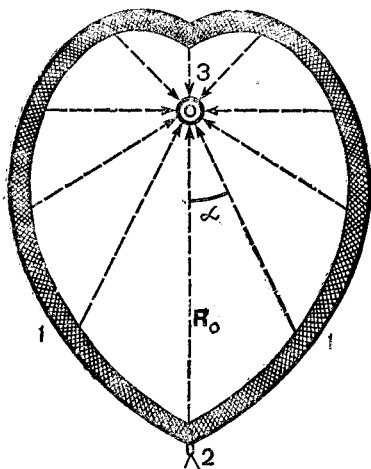


Рис. 4. Фокусирование действия взрывных газов при помощи взрыва заряда, имеющего форму двух логарифмических спиралей. 1 — спиральный заряд; 2 — детонатор; 3 — место фокусирования энергии взрыва.

вправо от этой же линии. Детонатор, дающий начальный импульс взрыву, располагается в начальной точке обеих ветвей логарифмической спирали.

Таким образом, рассматриваемый заряд имеет контур, напоминающий условную форму сердца, на нижней части которого помещен детонатор.

При взрыве такого заряда энергия взрывных газов, движущихся внутрь его контура, сходится в фокусе, находящемся в начале полярной системы координат.

Чтобы опыт дал в полной мере описанный результат, заряд должен быть выполнен с точностью до 1 мм (или даже выше) в соответствии с приведенной выше формулой. Это обусловлено тем, что зона максимальной концентрации энергии, получаемая вокруг начала коор-

динат, очень невелика по своим размерам. Ее диаметр соответствует в первом приближении диаметру примененного удлиненного заряда.

Высокая степень концентрации энергии в фокальной области проявляется в том, что в металлическом листе (на котором положен взрываемый заряд) в месте фокуса пробивается резко очерченное отверстие, как будто просверленное сверлом или проштампованное соответствующим штампом.

Еще более высокую концентрацию энергии взрывных газов можно получить, если применить полый заряд, имеющий вид сосуда, стенка которого выполнена в форме отрезка логарифмической спирали. Другими словами, этот заряд осуществляется в виде тела вращения, образующей которого является отрезок логарифмической спирали, а осью — линия, соответствующая начальному радиусу логарифмической спирали R_0 .

Считается, что заряды взрывчатых веществ, изготовленные на основе рассмотренных принципов, могут иметь в будущем существенное значение для решения ряда задач взрывной технологии в химии.

Трудность экспериментирования с такими полыми зарядами вызвана тем, что взрывные газы движутся после взрыва не только внутрь полого заряда, но и наружу. Вследствие этого место взрыва обволакивается облаком дыма, который маскирует явления, протекающие в центральной зоне, где ожидается максимальная концентрация энергии.

В настоящее время известны эксперименты, проводимые в существенно менее обоснованных теоретически условиях. Можно, например, в прямоугольной тротиловой шашке высверлить цилиндрическое отверстие, диаметр которого равен примерно половине ширины шашки. Если детонатор расположить в средней части торца шашки и произвести взрыв, то зона концентрации действия взрыва будет расположена по линии, параллельной оси отверстия и смещенной от этой оси на величину, равную примерно одной шестой части диаметра отверстия.

Опыты с такими зарядами приводят к неожиданным и, как правило, ярко выраженным результатам. Если, например, вдоль фокальной оси поместить железный цилиндрический, стержень, то он после взрыва умень-

шает в зоне действия взрыва свой диаметр примерно в 2 раза. Если длина стержня существенно больше толщины заряда, то по краям обжатой зоны образуются ша рообразные утолщения стержня. Именно в эти утолщения оказывается выдавленным металл из зоны обжатия. В результате выдавливания обе половины стержня получают значительные осевые скорости. Если концы стержня не закреплены должным образом, то стержень начинает при действии взрыва быстро растягиваться и разрывается на две части.

Поверхность разрыва проходит при этом посередине обжатой зоны.

Картина возникновения центра сосредоточения значительной энергии внутри полости, сделанной в заряде, такая же, как и внутри пористого взрывчатого вещества. Как правило, все обычные взрывчатые вещества, применяемые во взрывном деле, имеют некоторое количество пор, заполненных воздухом. В этих порах при детонации заряда возникает множество точек с повышенной концентрацией энергии. От этих точек в массе заряда распространяются вторичные ударные волны, которые улучшают детонацию. Это обстоятельство ясно вытекает из следующего факта.

В ряде случаев при бурении скважин на очень большую глубину вода, которая применяется при бурении для промывания, производит очень большое давление. Это связано с тем, что высота водяного столба в таких случаях достигает нескольких километров. Нередко в таких скважинах оказывается необходимым производить различные взрывы. И вот обнаружилось, что обычные взрывчатые вещества, отлично детонирующие на поверхности земли, погруженные на большие глубины в заполненные водой глубокие скважины, детонируют гораздо хуже или не детонируют вовсе.

Известный советский специалист по теории взрыва Ф. А. Баум отметил, что при высоком давлении вещество заряда настолько уплотняется, что поры исчезают. В результате этого исчезают также и точки концентрации энергии взрыва, а это приводит к прекращению процесса детонации.

Чтобы устранить этот недостаток, Баум предложил ввести в заряд весьма твердые тяжелые частицы. Волна детонации, встречая такие частицы, тормозится. Это

приводит к своеобразному удару, сопровождаемому повышением давления и температуры, т. е. к появлению новых точек концентрации энергии взрыва. Тем самым можно улучшить детонационную способность соответствующего взрывчатого вещества. Теоретическое предвидение полностью подтвердилось при взрывах зарядов в глубоких скважинах.

ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ ГАЗОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ

При взрыве прямоугольных зарядов взрывные газы расширяются потоками, которые направлены примерно по направлению перпендикуляров к граням заряда. Если подробнее рассмотреть поток взрывных газов, движущихся от плоской грани заряда, то можно установить, что этот поток расширяется тем значительнее, чем ближе расположен детонатор к центру грани. Если детонатор расположен непосредственно на этой грани, то крайние струи взрывных газов отклоняются в стороны от нормали к поверхности грани на угол, уже рассмотренный выше и равный $\varphi = 16^\circ,7$.

Если детонатор отстоит от центра грани на расстоянии, равном половине ширины этой грани, то этот угол уменьшается до значения, равного $10^\circ,8$.

Потоки взрывных газов, расширяющиеся таким образом, можно получить при взрыве кубического заряда с детонатором, находящимся в центре куба.

Если детонатор отнесен от центра грани заряда на полную ширину этой грани, то угол расширения потока газов снижается до значения $7^\circ,3$ (рис. 5).

Наконец, если детонатор удален от грани заряда весьма далеко, то угол расширения потока газов уменьшается до нуля.

Интересное явление возникает при детонаторе, расположенном на поверхности любой части заряда. В этом случае можно провести через точку, где расположен детонатор, перпендикуляр к поверхности заряда. Приняв этот перпендикуляр за ось, можно вокруг него построить конус, образующая которого составляет угол с перпендикуляром, равным $16^\circ,7$.

Внутри этого конуса, вблизи заряда, потока взрывных газов не будет. Таким образом, около места, откуда начинается распространение детонации (иначе говоря, около места инициирования взрыва), возникает небольшая защитная зона, где действие взрыва практически незаметно.

Это явление может быть показано на опыте следующим образом. Поместим против заряда с детонатором в центре грани свободно на каком-либо подвесе достаточ-

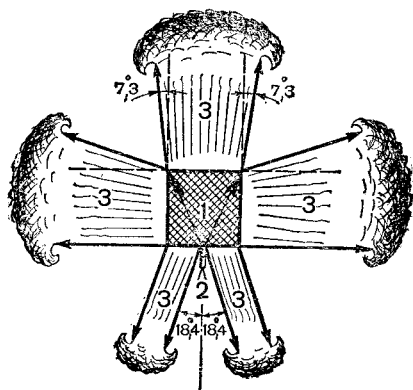


Рис. 5. Схема расширения взрывных газов кубического заряда.

1 — заряд; 2 — детонатор; 3 — потоки взрывных газов.

но прочную железную плиту. При взрыве на этой плите возникнет вмятина, соответствующая по своей ширине размерам газового потока, действовавшего на нее при взрыве. Однако около перпендикуляра к грани заряда, проходившего через место установки детонатора, вмятины практически не будет.

Это значит, что в средней части общей вмятины, будет выпуклость. Она соответствует месту, где плита не подверглась удару взрывных газов и согласно закону инерции не сместилась заметно из своего первоначального положения.

Направленные так газовые потоки излучают интенсивное свечение вследствие своей высокой температуры. Их можно легко сфотографировать, производя взрыв в темноте и применяя фотоаппарат с заранее открытым затвором.

Устойчивое движение газовых потоков можно наблюдать на расстояниях порядка ширины граней заряда.

Это происходит при взрыве заряда в обычном атмосферном воздухе. Взаимодействуя с воздухом, поток взрывных газов тормозится и растекается в стороны. Растекающиеся газы двух соседних потоков, сталкиваясь друг с другом, формируют новый поток, ось которого направлена по биссектрисе угла, разделявшего первоначальные газовые потоки.

Таким образом, на некотором расстоянии от взорванного заряда проявляется максимальное действие взрыва уже не против граней, а против ребер заряда. При дальнейшем расширении взрывных газов вторичные газовые струи также разрушаются и растекаются в стороны. В результате этого формируется система струй третьего поколения. У этой системы максимумы действия взрыва вновь оказываются направленными по перпендикулярам, построенным в центрах граней.

В воздухе впереди головных частей газовых струй образуется воздушная ударная волна. Это — зона повышенного давления в воздухе, ограниченная снаружи резким скачком давления, плотности и температуры воздуха.

Ударная волна перераспределяет свою энергию постепенно все более и более равномерно по всему своему фронту. Зоны наибольшего действия взрыва, образующие вначале мощные поперечные волны на фронте воздушной ударной волны, медленно затухают, и фронт воздушной ударной волны приобретает форму идеальной сферы.

Рассмотренные закономерности имеют существенное практическое значение и могут найти применение для объяснения многих явлений, выходящих за пределы элементарного взрыва.

Например, наблюдая взрывы зданий, аварии в химической и газовой промышленности, можно установить, что осколки взрываемых зданий летят, как правило, в направлениях, перпендикулярных к поверхности стен. Таким же путем движутся и взрывные газы. Располагая объекты в угловых зонах, можно обеспечить некоторую их защиту при возможных взрывах. Этот принцип имеет большое значение при проектировании ответственных промышленных комплексов. Отдельные здания, в которых могут произойти какие-либо взрывы, как в результате нарушений производственного процесса,

так и по другим причинам, хранилища взрывоопасных материалов должны быть размещены друг относительно друга с учетом направлений расширения взрывных газов. Отдельные взрывоопасные здания не должны иметь близких друг к другу параллельных стен. Они могут взаимно сближаться своими углами, располагаясь по диагонали друг к другу.

Отдельно следует рассмотреть движение газов и осколков при взрыве удлинённых зарядов. В этом случае следует учесть, что при движении детонации по достаточно длинному заряду он разрушается постепенно. После прохода через какое-либо сечение удлинённого заряда волны детонации, взрывные газы начинают расширяться по направлениям радиусов заряда. При этом расширяющаяся часть оболочки заряда приобретает форму воронки, раскрывающейся в ту сторону, откуда пришла волна детонации. Дальнейшее растяжение оболочки приводит к ее разрыву на отдельные осколки.

При такой схеме разрушения, направления движения осколков и газов, несущих основную энергию взрыва, всегда отклоняются от перпендикуляра к оси заряда.

Если осколки получают при взрыве начальную скорость v_0 , а скорость распространения детонации равна D , то угол отклонения траекторий от перпендикуляра оказывается равным

$$\varphi = \arcsin \frac{D}{v_0}.$$

Отсюда следует, что φ тем значительнее, чем больше скорость разлета осколков.

Если происходит выброс грунта при взрыве удлинённых зарядов (заложённых в грунте с целью создания взрывом выемки или канала), то потоки выбрасываемого грунта не только направляются вверх и в стороны, но также и несколько наклоняются в направлении распространения детонации.

ВСТРЕЧНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ

При любых видах превращения и распространения энергии все процессы, как известно, в основном протекают так, чтобы энергия перемещалась

из мест, где ее концентрация больше, в места с меньшей концентрацией энергии. Это правило выполняется также и при взрыве. Взрывные газы движутся так же, перенося свою энергию из мест, где давление и температура выше, т. е. энергия более концентрирована, в места с более низкими давлениями и температурами. Выполнение этого правила является проявлением второго начала термодинамики. Этот всеобщий закон наряду с первым началом термодинамики, законом сохранения энергии, представляет собой основу учения о движении всех известных нам форм материи.

Распространение детонации во взрывчатом веществе дает возможность реализовать процесс повышения концентрации энергии во взрывных газах. Одной из простейших форм решения этой задачи является «встречное иницирование». Оно состоит в следующем. В немного удлиненном заряде помещают на концах два детонатора. Эти детонаторы взрывают одновременно с возможно более высокой точностью, выдерживая эту одновременность. Это может быть достигнуто путем подачи на электродетонаторах двух одновременных электрических импульсов. Можно также соединить эти детонаторы с третьим детонатором тонкими удлиненными зарядами (детонирующими шнурами) равной длины и таким способом обеспечить одновременное действие двух детонаторов.

Если описанными способами созданы в заряде две детонационные волны, идущие навстречу друг другу, то в момент соударения этих волн потоки взрывных газов, движущихся за их фронтами, внезапно тормозятся. Происходит как бы удар газовых масс о непреодолимую, абсолютно жесткую преграду, которая не сдвигается и не деформируется, несмотря на гигантские давления.

Таким способом можно в средней части заряда создать взрывные газы с повышенной концентрацией энергии. Эти газы имеют такие свойства, как если бы они образовались при детонации какого-то несуществующего сверхмощного взрывчатого вещества. Из зоны соударения волн детонации выбрасывается во все стороны узкий диск весьма быстро расширяющихся взрывных газов, способных резать металлические детали и вообще сильно разрушать различные прочные объекты.

Рассмотренный пример повышения концентрации энергии взрыва не является единственным во взрывной

технике. Описанные примеры соударения взрывных газов в случае углового, кольцевого и спирального зарядов следует отнести к замечательной области управления человеком энергетикой взрыва.

КОНИЧЕСКАЯ УДАРНАЯ ТРУБА — КОНЦЕНТРАТОР ЭНЕРГИИ

Много десятилетий назад известный русский ученый — профессор Н. Е. Жуковский — отец советской авиации обратил внимание на сходство в физико-математических свойствах воздушных ударных волн (в частности, возникающих при взрывах) и волн на поверхности воды. Это сходство можно подметить при внимательном наблюдении за многими явлениями природы, например, за структурой волн, пересекающих весенний ручеек, вдоль тротуара. Можно на таком примере видеть, как волны на воде, подходя к краю тротуара и отражаясь от него, существенно повышают свою интенсивность и создают треугольный хвост бурлящей пены.

Это явление оказывается куда более грозным, если оно возникает в более крупном масштабе. Доказательством этого могут служить горные сели — внезапно возникающие сильные наводнения в узких горных долинах. Так, например, в 1963 г. в 70 км к юго-востоку от города Алма-Аты в жаркий летний день — воскресенье — в горах Ала-Тау прошли ливневые дожди и возникло массовое таяние снега на вершинах гор. В результате этого в одной из горных долин образовалась гигантская волна, шедшая вниз по течению небольшой речки со скоростью железнодорожного поезда.

Наблюдения за разрушениями, вызванными этой волной, позволили установить, что она особенно усиливалась тогда, когда, собрав воду в более или менее широкой долине, волна входила в клинообразно суживавшееся ущелье. В некоторых местах высота водяной стены доходила до 60 м. Очевидно, что разрушающая сила удара такого водяного молота была ужасной. За несколько минут были снесены огромные массы выступов гор и уничтожено прекрасное озеро Иссык.

Вот, нечто подобное может быть осуществлено и при эксперименте с воздушной ударной трубой. В такую трубу направляют воздушную ударную волну, созданную взрывом. Трубе можно придать коническую форму, чтобы сечение ее постепенно уменьшалось. В этом случае площадь фронта воздушной ударной волны при движении в конической трубе будет непрерывно и быстро снижаться, а концентрация энергии в волне расти.

В. А. Белоконь, экспериментируя с такими трубами, установил, что давление на фронте воздушной ударной волны можно таким путем поднять в десятки раз. Однако дальнейшее наращивание концентрации энергии не может протекать безгранично. Сильно нагретый и сжатый воздух начинает интенсивно светиться, и световое излучение уносит энергию из зоны за фронтом. Это пока ограничивает возможности повышения концентрации энергии взрыва с помощью сходящихся ударных труб. Однако не исключено, что эти трудности будут так или иначе преодолены.

Сужающаяся ударная труба является прибором, имеющим сходство с линейным зарядом, изогнутым в форме, соответствующей ветви логарифмической спирали, которая была рассмотрена выше. Спиральный заряд дает сходящиеся потоки газов, а коническая сужающаяся труба, сжимая ударную волну, также порождает за фронтом этой волны сходящиеся потоки воздуха. При этом труба сжимает поток со всех сторон. Чтобы обеспечить это с использованием заряда, построенного по схеме логарифмической спирали, необходимо изготовить заряд в виде тела вращения с логарифмической образующей. Развитие экспериментов в этой области следует считать одной из плодотворных проблем ближайшего будущего.

ГЛОБАЛЬНЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ УДАРНЫЕ ТРУБЫ

Ударные трубы, создаваемые человеком в лабораториях, не единственные устройства, направляющие энергию волн и потоков частиц в определенном направлении и обеспечивающие концентрацию энергии

в этих потоках. Природа создала гигантские, если можно так выразиться, «естественные конструкции», решающие те же задачи в глобальных и даже космических масштабах.

Рассмотрим прежде всего условия движения ударных, звуковых и инфразвуковых волн в воздухе. Скорость распространения таких волн зависит от абсолютной температуры воздуха (т. е. температуры, отсчитываемой от абсолютного нуля, находящегося при -273°C). Эта скорость пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры.

Если проследить за изменением температуры в земной атмосфере, то в целом получится такая картина. При подъеме от поверхности Земли до высоты около 10 км, в пределах слоя атмосферы, называемого тропосферой, мы наблюдаем непрерывное понижение температуры до минус $50-60^{\circ}\text{C}$. Далее, в пределах высот от 10 до 20 км температура остается примерно постоянной. Еще выше, в пределах стратосферы, на высотах от 20 до 50 км температура повышается примерно до 0°C . При таких условиях очевидно, что скорость ударных волн уменьшается в тропосфере и остается почти постоянной на высотах от 10 до 20 км, а выше возрастает.

При распространении волн в такой атмосфере всегда будет отставание волны на высотах от 10 до 20 км и опережение выше и ниже этого слоя. Таким образом, фронт волны будет иметь всегда некоторый прогиб на высоте 10—20 км.

Известно, что энергия волн распространяется в направлениях, перпендикулярных фронту. Это значит, что энергия воздушных волн будет отклоняться вверх в тропосфере и вниз в стратосфере, концентрируясь в слое воздуха на высотах 10—20 км. Другими словами, тропосфера и стратосфера окажутся как бы преградами, направляющими волны в пределах слоя воздуха, имеющего очень малую толщину по сравнению с размерами Земли. Этот слой можно рассматривать как ударную трубу, охватывающую своей сферической конструкцией весь земной шар.

При достаточно сильных воздействиях, например, при таких природных взрывах, какие бывают иногда во время извержения вулканов, или при ядерных взрывах, осуществляемых человеком, возникают мощные ударные

волны, которые проникают в рассмотренную нами глобальную ударную трубу и движутся по ней на тысячи и десятки тысяч километров. При этом следует учесть, что при распространении на первых 10 тыс. км (четверть окружности земного шара) волна ослабевает за счет расширения ее фронта. При движении в пределах от 10 до 20 тыс. км от места своего возникновения волна идет по сужающейся ударной трубе. На расстоянии 2000 км от места своего возникновения волна сходится в месте, противоположащем месту своего возникновения в своеобразном фокусе, где ее интенсивность заметно возрастает.

Далее волна движется, проходя по уже пройденному пути, но в обратном направлении. Таким образом, достаточно сильные волны могут обойти земной шар несколько раз, периодически повышая и понижая свою интенсивность.

Эти явления можно наблюдать достаточно просто. Например, в августе 1883 г. в Индонезии, между островами Ява и Суматра, взорвался вулкан на небольшом острове Кракатау. В воздух было выброшено из-под земли более 19 км³ вулканического газа. Возникшая при этом волна обошла земной шар несколько раз, и ее прохождение регистрировалось в различных точках Земли по незначительному, но достаточно определенному повышению атмосферного давления. По ряду причин волна на значительных расстояниях от места взрыва вулкана стала настолько плавной, что ее следовало отнести к инфразвуковой части спектра звука, не воспринимаемой слухом человека. Непосредственно на слух взрыв Кракатау воспринимался на расстоянии до 3000 км. Если бы не было в атмосфере той ударной трубы, которую мы рассмотрели, то все описанные явления не могли бы осуществиться.

Такие же явления повторились 30 июня 1908 г., когда в Сибири, в бассейне реки Подкаменная Тунгуска, взорвался в воздухе крупный метеорит. Этот взрыв по своей энергии соответствовал ядерным взрывам с тротиловым эквивалентом порядка миллионов тонн. В этом случае воздушная волна была зарегистрирована также в пределах всего земного шара, а звук взрыва воспринимался на расстояниях порядка тысячи километров.

Совершенно другого рода ударные трубы можно найти в ближнем космосе, т. е. в космическом пространстве, окружающем земной шар. Как известно, Земля является магнитом, и земное магнитное поле простирается на сотни тысяч километров в окружающем космическом пространстве. Силовые линии этого поля сходятся к магнитным полюсам Земли, находящимся, как известно, около Северного и Южного полюсов Земли. Удаляясь от Земли, магнитные силовые линии расходятся, удаляясь друг от друга, и образуют замкнутые дуги, концы которых упираются на поверхность земного шара. Вот, эти гигантские системы магнитных силовых линий и обладают, в частности, свойствами, превращающими их в космические сужающиеся ударные трубы, направляющие определенным образом потоки заряженных электричеством частиц, идущих к Земле от Солнца и из других областей космического пространства.

Известно, что частицы, несущие на себе электрические заряды, движутся в магнитном поле по спиральным траекториям, закручивающимся вокруг магнитных силовых линий. Чем сильнее магнитное поле и чем ближе друг другу идут силовые линии, тем круче поворачивают силовые линии и тем меньше диаметр трубки, внутри которой проходит спиральный путь частиц. Следовательно, если в магнитное поле Земли входит из космического пространства поток частиц, заряженных электричеством, то по мере приближения к Земле, этот поток концентрируется и направляется в область, близкую к одному из магнитных полюсов Земли. В большинстве случаев частицами, захватываемыми магнитным полем Земли, являются протоны (т. е. ядра атомов водорода), летящие от Солнца. В зависимости от активности процессов, протекающих на Солнце, потоки протонов могут иметь совершенно различную интенсивность, быстро меняющуюся во времени.

Потоки протонов, концентрированные и направленные магнитным полем Земли, входя в верхние слои земной атмосферы, действуют на эти слои и производят в этих слоях (в ионосфере) интенсивную ионизацию атмосферного воздуха, которая сопровождается характерным свечением, которое легко можно наблюдать с

Земли. Это свечение издавна хорошо известно как полярное сияние.

Существенной особенностью всех полярных сияний является то, что они наблюдаются почти исключительно в полярных зонах Земли. Полярных сияний почти не бывает в средних широтах. Их концентрация вблизи магнитных полюсов Земли легко может быть объяснена концентрацией в этих районах магнитных силовых линий.

По-видимому, такие же явления происходят и в атмосферах других небесных тел, если они обладают достаточно сильным магнитным полем. Таким образом, понятие ударной трубы имеет значение для различных областей знания. Здесь смыкаются простые и общие соображения, имеющие значение как в специальных областях техники, так и для понимания строения Вселенной. По мере увеличения научной информации о больших планетах Солнечной системы — Сатурне и Юпитере — изложенные здесь соображения будут, по-видимому, иметь все возрастающее значение.

АТМОСФЕРА — УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Ускорители элементарных частиц имеют, как известно, огромное значение в современной экспериментальной физике. Как правило, все существующие ускорители используют электромагнитные силы и сообщают значительные скорости частицам, несущим на себе электрические заряды. Ускорителей, сообщающих высокие скорости нейтральным (в¹ электрическом отношении) частицам, пока человек еще не создавал. Тем более интересным и неожиданным следует считать тот факт, что обычная атмосфера Земли так же, как и атмосферы других небесных тел, при определенных условиях могут быть использованы как ускорители частиц независимо от наличия или отсутствия у них электрических зарядов.

Начнем знакомство с этим вопросом с того, что в любом газе частицы ускоряются при прохождении фронта воздушной ударной волны и движутся в направлении распространения этой волны.

Выделим в атмосфере столбик воздуха сечением, равным единице. Пусть через этот столбик, по его оси, проходит ударная волна в течение единицы времени. За это время волна пройдет путь, равный ее скорости D , и вовлечет в движение массу воздуха, равную ρD . Здесь ρ — плотность воздуха.

Количество движения у этого воздуха равно ρDU_{ϕ} , где U_{ϕ} — скорость воздуха. Как известно, согласно закону сохранения количества движения оно равно импульсу силы, действовавшей на соответствующую массу. В рассматриваемом нами случае сила равна избыточному давлению ΔP_{ϕ} , действующему в течение одной секунды. На этом основании можно написать

$$\Delta P_{\phi} = DU_{\phi}\rho.$$

Отсюда следует

$$U_{\phi} = \frac{\Delta P_{\phi}}{\rho D}.$$

Из этой формулы видно, что скорость частиц газа за фронтом ударной волны тем значительнее, чем меньше плотность газа, и способна достигнуть таких величин, при которых возможна ионизация воздуха в результате удара молекул. Отсюда можно сделать вывод о том, что при движении в земной атмосфере ударных волн, идущих снизу вверх, скорость молекул воздуха существенно возрастает.

Рассмотрим, например, такое известное явление, как землетрясение. В этом случае глубокий источник энергии внутри земной коры посылает в сторону земной поверхности целую последовательность сейсмических волн. Земная поверхность немного смещается, когда эти волны достигают этой поверхности, и передает некоторую долю энергии атмосфере. Эта доля энергии сравнительно невелика. Однако она передается воздуху на очень большой площади. Поэтому воздушная ударная волна, уходящая в воздухе вверх, мало ослабляется (по сравнению с волной сосредоточенного заряда). Отсюда следует, что волны, порожденные землетрясением, достигают ионосферы, имея значительную интенсивность, и могут на высотах, измеряемых сотнями километров, вызывать ионизацию атомов и молекул воздуха. После ионизации оторванные от атомов и молекул

электроны постепенно возвращаются на свои места и выделяют энергию ионизации в форме излучения электромагнитных волн, в частности, видимого света. Этим объясняется появление вспышек света, если землетрясение происходит ночью и солнечный свет не маскирует излучений ионосферы.

Свечение при землетрясениях очень похоже на свечение при полярных сияниях. Эти явления, как мы видим, имеют общую природу. Разница состоит только в том, что полярные сияния обусловлены действием потоков частиц, приходящих из космоса и направляемых магнитным полем земли, а свечение при землетрясениях вызывается частицами, движущимися снизу и ускоренными в атмосфере в результате действия описанного здесь механизма.

Помимо ионизации, частицы, ускоренные в ионосфере ударной волной, могут производить и многие другие интересные явления. В частности, они могут вырываться в космическое пространство и уходить не только за пределы тяготения Земли, но и за пределы тяготения Солнца.

ГЕНЕРАТОРЫ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ И УДАРНЫХ ВОЛН

Для получения кратковременных регулярных газовых потоков, необходимых для различных научных экспериментов или используемых на производстве, можно с удобством применять взрывчатые вещества. Заряд, взрываемый в достаточно прочной трубе или в открытом пространстве, около отверстия такой трубы способен создать внутри трубы кратковременный газовый поток, имеющий скорость порядка нескольких тысяч километров в секунду. Если требуется, чтобы головная часть потока имела правильную форму и была ограничена плоским фронтом ударной волны, необходимо придать заряду взрывчатого вещества определенную форму. Наиболее простое решение этой задачи состоит в том, чтобы использовать заряд в форме полого конуса и разместить детонатор на вершине этого конуса. Образующие внутренней полости и внешней поверхности конуса должны быть наклонены по отношению к

оси заряда (и трубы, на конце которой помещен заряд) на угол $\Psi = 73^{\circ},3$. Коническая полость заряда должна перекрывать все отверстие трубы. Чтобы взрыв не действовал непосредственно на стенки трубы, их краю, обращенному в сторону заряда, придается заостренный профиль наподобие ножа. Край заряда вокруг полости тоже должен иметь заостренный профиль.

Генерирование ударных волн с правильным плоским фронтом тоже можно осуществить с помощью таких зарядов. Однако для обеспечения возможно более правильного фронта ударной волны с плоской поверхностью можно несколько видоизменить конический заряд, выполнив его внешнюю часть из взрывчатого вещества с более высокой скоростью детонации D_1 и заполнив внутреннюю коническую полость взрывчатым веществом с меньшей скоростью детонации D_2 . Коническая граница между этими веществами должна иметь образующую, идущую под углом

$$\varphi_1 = \arccos \frac{D_2}{D_1}.$$

В этом случае детонационная волна, вызванная действием детонатора на внешний слой взрывчатого вещества, будет так преломляться при входе во внутренний конус из другого взрывчатого вещества, что в этом конусе образуется плоская детонационная волна, имеющая фронт, параллельный основанию конуса. Когда этот фронт подойдет к поверхности основания конуса, он создаст поток газов, выходящих одновременно за границу заряда и порождающих плоский фронт воздушной ударной волны внутри трубы, направляющей эту волну без возможности ее бокового расширения.

Описанным способом можно создавать воздушные ударные волны, у которых воздух движется за фронтом со скоростью порядка 2000 м/сек. Это достаточно сильные волны, которые могут быть использованы для проведения экспериментов с мощным воздействием волны на различные объекты.

Если же требуется получить еще более быстрые волны, то необходимо учесть следующее. Обычные взрывные газы, имеющие молекулярный вес порядка 30, не могут расширяться существенно быстрее, чем

2000 м/сек, и поэтому не могут создать более сильных и быстрых воздушных ударных волн.

Чтобы решить эту задачу, можно использовать газовую пушку. Она состоит из двух стальных стволов, соединенных так, чтобы они имели общую ось. Хвостовой частью этого устройства служит ствол несколько большего диаметра. В нем помещается обычный заряд соответствующего пороха и очень легкий снаряд. При выстреле снаряд начинает двигаться и сжимает находящийся в стволе газ с малым атомным весом—обычно гелий. Снаряд расходует всю свою кинетическую энергию на сжатие этого газа и останавливается. В этот момент освобождается легкий снаряд-поршень во втором стволе, меньшего диаметра, который является продолжением первого ствола. Сжатый в первом стволе до высокого давления газ входит во второй ствол и сообщает движущемуся в нем поршню постепенно нарастающую скорость. Так как газ, имеющий малый атомный вес, способен расширяться со скоростью, существенно превышающей скорость обычных пороховых газов, то во второй трубе можно создавать существенно более мощные воздушные ударные волны. Скорость поршня и перемещаемого им воздуха за фронтом воздушной ударной волны во втором стволе может быть легко доведена до 5000 м/сек. Это очень большая скорость, которая существенно расширяет возможности экспериментатора и пока способна удовлетворить решению выдвинутых наукой задач.

Необходимо иметь в виду, что волны, создаваемые такими генераторами, можно направить в коническую трубу, где параметры на фронте волны можно еще заметно увеличить.

Далеко не при всех экспериментах необходимо создавать столь сильные воздушные ударные волны. Во многих случаях оказывается достаточным применить для генерирования волн элементарную камеру с сжатым воздухом (с помощью воздушного компрессора). Эта камера отделяется от ударной трубы легкой, но прочной мембраной. В мембрану введена тонкая проволока. Пропуская через эту проволоку мощный электрический импульс, можно проволоку пережечь и разрушить мембрану. После этого воздух из камеры выходит в удар-

ную трубу и создает в ней ударную волну со сравнительно незначительными давлением и скоростью.

В ряде случаев можно обойтись без воздушного компрессора и создавать воздушную ударную волну при помощи поршня, перемещаемого падающим грузом или предварительно сжатой пружиной.

В качестве перспективной возможности намечается использование для ускорения поршня мощных импульсных магнитных полей. Это значит, что в системе, ускоряющей поршень, такое рабочее тело, как газ, например гелий, заменяется магнитным полем. Скорость распространения магнитного поля, как известно, равна 300 000 км/сек, в то время как предельная скорость расширения легких газов не превышает 10 км/сек. Из этого сопоставления видны те гигантские возможности, которыми может в будущем воспользоваться экспериментатор.

В заключение этого раздела можно сделать еще следующее замечание. Всюду, где дело касалось легкого газа, был назван гелий. Между тем известно, что такой общеизвестный газ, как водород, имеет атомный вес существенно меньше, чем у гелия. Поэтому возникает вопрос, почему же не используется водород? Ответ на этот вопрос необычен. Оказывается, что при больших давлениях водород очень легко проникает в металлы. Плотные металлы для водорода при значительных давлениях напоминают такое вещество, как губка. Подобно тому как губка способна поглощать воду, металлы легко и быстро растворяют в себе значительные объемы водорода. Очевидно, что при таких условиях водород невозможно использовать в мощных генераторах воздушных ударных волн.

СРЕДСТВА ГАШЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ И УДАРНЫХ ВОЛН

Управление газовыми потоками и ударными волнами, очевидно, возможно, если генераторы этих потоков и волн дополняются средствами их торможения и гашения. В общем, можно считать, что гашение ударных волн по своей физической сущности заключается в торможении газовых потоков за фронтом

волны. Таким образом, в целом эта задача сводится к снижению скорости газа при помощи различных средств. В основном эти средства можно свести к следующему:

— пропускание газового потока через одну или несколько расширительных камер;

— пропускание газового потока через систему узких каналов, оказывающих повышенное сопротивление движению газа;

— помещение на пути газового потока таких устройств, которые поглощают энергию избыточного давления газа.

Первые два способа в принципе достаточно просты и понятны. Конечно, расчет параметров соответствующих гасителей, ослабляющих потоки газов путем их расширения или торможения, является достаточно сложным. Однако на таком специфическом вопросе мы здесь останавливаться не будем потому, что с этим вопросом не связаны какие-либо принципиальные возможности создавать нетривиальные и глубокие пути управления движением газовых масс.

Отметим лишь, что в ряде случаев возможны очень простые решения. Например, прослойка из крупного песка или щебня может быть достаточной для решения многих практических задач.

Существенно отличается от этих способов третий прием гашения энергии потоков и волн. Этот прием можно осуществлять в воде.

Если на пути подводной ударной волны имеется более или менее крупная воздушная полость, то она как бы притягивает действие взрыва в воде. В воде, находящейся между местом взрыва и полостью, действие взрыва усиливается. При этом такое усиление происходит не за счет повышения параметров на фронте волны, а за счет усиления действия прямо проходящей волны действием волны разрежения. Эта волна возникает тогда, когда ударная волна, дойдя до поверхности полости, начинает сжимать полость. Простые расчеты позволяют считать, что в результате действия разрежения скорость среды около поверхности полости увеличивается вдвое. Энергия движения, как известно, пропорциональна квадрату скорости этого движения. Таким образом, в непосредственной близости от полости, ее наличие увеличивает эффективное значение веса заряда в

4 раза. Это подтверждается на опыте. Если в воде происходит, например, перерезывание балки или швеллера, то необходимый эффект действия взрыва при наличии достаточной по размерам полости может быть достигнут при применении заряда, в 4—6 раз меньшего, чем в воздухе.

Совершенно иначе действует полость при ее расположении между местом взрыва и объектом, воспринимающим действие этого взрыва. Это обусловлено тем, что волна разрежения, идущая от полости, уменьшает время действия давления и смещение среды за фронтом воздушной волны.

Если полость достаточно велика и объект, защищаемый ею, находится у поверхности полости со стороны, противоположной месту взрыва, то первоначальное действие подводной волны исчезнет совсем и защищаемый объект может получить нежелательное повреждение при последующем движении воды, когда пульсирует газовый пузырь, возникший на месте взрыва, а воздушная полость в определенной мере повторяет движение этого газового пузыря.

Кроме того, воздушный пузырь может полностью исчезнуть, причем в нем возникает мощная струя, направленная по линии, идущей от места взрыва к противоположной стороне полости. Эта струя может произвести сильный гидравлический удар по противоположной поверхности воздушной полости. При этом воздушный пузырь расчленивается на несколько меньших пузырей, которые могут всплыть, если взрывом разрушена содержащая его емкость.

ГАЗОВЫЕ ПОТОКИ КИНЖАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Генераторы газовых потоков и ударных волн, рассмотренные выше, предназначались для создания таких потоков, которые имеют в своей головной части плоскую ударную волну. При таких условиях не происходит интенсивного перемешивания газовой струи и окружающей среды. Между тем в ряде случаев оказывается необходимым достигнуть максимального перемешивания взрывных газов и окружающего атмосфер-

ного воздуха. Это, например, необходимо для получения максимальной энергии взрыва при применении таких взрывчатых веществ, которые имеют недостаточно кислорода для полного окисления (догорания) взрывных газов.

Примером такого взрывчатого вещества является наиболее распространенный и известный тротил. При его взрыве образуется много недогоревшего распыленного угля (копоть) и окиси углерода (угарного газа). То и другое может сгореть за счет атмосферного кислорода.

Чтобы такое догорание могло произойти полностью, требуется отличное перемешивание взрывных газов и окружающего место взрыва воздуха. Такое перемешивание само собой не происходит. Чтобы оно осуществилось наилучшим образом, необходимо направить эти газы не в виде сплошного облака, а в форме отдельных концентрированных струй, рассекающих массу атмосферного воздуха. Эти струи, внедряясь в воздух и встречая его сопротивление, разворачиваются в своей головной части в кольцевые вихри. При наблюдении за струей это выглядит так, что она приобретает вид грибка, края которого расширяются и образуют многослойный кольцевой вихрь. В этом вихре перемежаются слои воздуха и слои взрывных газов.

При таких условиях поверхность взаимного контакта атмосферного кислорода и недогоревших взрывных газов оказывается весьма большой и догорание этих газов протекает очень быстро.

За счет выделяемого тепла облако взрывных газов дополнительно расширяется, и энергия этого расширения в конечном итоге усиливает воздушную ударную волну, создаваемую в воздухе расширяющимися взрывными газами.

Чтобы обеспечить при взрыве движение газов, которое можно определить наглядным термином «кинжальное действие», заряду взрывчатого вещества целесообразно придать особую форму. На поверхности заряда следует выполнить ряд выемок полушаровой, конической или клинообразной формы. При взрыве взрывные газы устремляются к средней части выемок и складываются в мощные струи, уходящие в окружающее пространство.

При определенных условиях догорание взрывных газов в атмосфере приобретает особое значение. С этой точки зрения интересен конкретный пример — взрыв при создании плотины на реке Малая Алмаатинка, вблизи города Алма-Аты, в 1966 г.

Задачей взрыва являлось перемещение значительной массы горной породы для возведения плотины, защищающей от наводнений (горных селей) столицу Казахстана, город Алма-Ату. Для взрыва использовался тротил; заряды были заложены на глубине около 100 м в камерах около откоса горы. При таких условиях взрывные газы должны были значительно расшириться, прежде чем они могли выйти в атмосферу, перемещая массу взрывающей горной породы. При расширении газы должны были существенно охладиться. Это приводило к предположению, что догорание этих охлажденных газов в атмосфере не осуществится или будет протекать недостаточно интенсивно.

В результате в воздухе могло остаться много несгоревшего угарного газа (окси углерода) и других вредных веществ (в частности, синильной кислоты). Это представляло значительную опасность для окружающего населения, в частности для жителей города Алма-Аты, так как облако взрывных газов ветер мог отнести в сторону на расстояние в несколько километров.

Особенно легко облако газов, смешанное с частицами грунта и обладающее повышенной плотностью, могло переместиться в сторону Алма-Аты по долине реки Малая Алмаатинка. Детальный анализ этой проблемы показал, что опасения были напрасными. Дело в том, что даже охлажденные взрывные газы тротила не могли не воспламениться хотя бы в нескольких точках вследствие каталитических явлений, стимулирующих развитие таких реакций, как окисление газов.

Действительность подтвердила этот прогноз. Взрывные газы, выброшенные в виде огромного черного облака, вскоре пронизало красное пламя. За счет горения это облако нагрелось до высокой температуры. От нагревания газы значительно расширились и стали быстро подниматься вверх. Наблюдения показали, что высота подъема была необычно большой, порядка 8 км. Поднимающееся облако взрывных газов увлекло вверх и окружающий воздух. Поэтому к месту взрыва устре-

мился воздух со всех сторон и в первую очередь вверх по долине реки Малая Алмаатинка. Таким путем было надежно обеспечено полное проветривание зоны взрыва, и опасения относительно газовой опасности полностью исключены. Можно полагать, что описанные явления будут в дальнейшем учитываться для обеспечения безопасного газовойоздушного режима в зоне взрыва.

ВАКУУМНЫЕ КАМЕРЫ

В последние годы применение взрыва в обработке металлов нашло широкое распространение. Штамповка изделий взрывом, сварка разнородных металлов путем их сжатия силой взрыва и другие приемы взрывной технологии привели к тому, что взрыв стал широко использоваться на металлообрабатывающих заводах. При этом возникла настоятельная необходимость производить взрывные работы непосредственно внутри зданий крупных цехов. В этих условиях громкий звук и вообще ударная волна взрывов оказались крайне неудобными, мешающими работе всего цеха. Необходимо было погасить ударную волну.

На практике для решения этой задачи было предложено и освоено следующее средство. В месте, где производился взрыв, устраивался специальный металлический колпак размером в несколько метров. Этот колпак подвешивался на тросе и с помощью крана опускался сверху, прикрывая подготовленную к взрыву установку. При помощи обычного центробежного вентилятора под колпаком создавалось пониженное давление воздуха. На основе теории и экспериментов установлено, что давление в воздушной ударной волне зависит от первоначального давления в том воздухе, где распространяется волна. Таким образом, снижая давление воздуха, можно заранее принять меры к ослаблению действия взрыва в этом воздухе.

Таким путем на практике оказалось возможным обеспечить такой режим ведения разрывных работ, при котором звук взрыва не только был ослаблен, но практически оказался совершенно незаметным. Таким образом, снижение давления воздуха оказалось практически весьма эффективным средством гашения воздушных

ударных волн, возникающих при взрывах сравнительно небольшой силы.

Вентилятор описанной установки продолжал работать и некоторое время после взрыва. Это позволяло удалять в вентиляционный канал все взрывные газы и полностью исключало опасности и трудности, которые неизбежно возникли, если бы взрывные газы оставались в помещениях цеха.

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ВЕНТИЛИ

В различных устройствах, применяемых при некоторых экспериментах, а также для решения практических задач возникает необходимость такого управления распространением волны детонации, при котором детонация в одном направлении передается беспрепятственно, в то время как в обратном направлении она пройти не может.

Такое устройство помещается на длинных линейных зарядах, в частности на детонирующих шнурах. По своему смыслу это устройство представляет собой аналогию обычному клапану (или вентилю), применяемому в гидравлических и пневматических системах. Это устройство можно назвать детонационным вентиляем или детонационным клапаном. Его устройство может быть достаточно простым.

Можно, например, в длинном линейном заряде осуществить небольшой разрыв. Подходящие к месту разрыва части удлиненного заряда следует оформить различно. Один из торцов следует выполнить в виде плоского среза поверхностью, перпендикулярной оси заряда. Противоположный торец следует срезать косой поверхностью, образующей острый угол с осью заряда. Такая система действует в соответствии со следующей схемой. Если детонация передается от прямого среза к косому, то ее передача обеспечивается тем, что поток взрывных газов идет от прямого среза по оси заряда. Таким образом, взрывные газы, пройдя свободный воздушный промежуток, встречают косой срез и, воздействуя на него, возбуждают детонацию в расположенном далее заряде.

Если же детонация распространяется в обратном направлении, то, подойдя к воздушному промежутку, она

вызывает расширение взрывных газов с косо́го среза. В соответствии с рассмотренными выше законами движения взрывных газов в этом случае поток этих газов будет отклонен на значительный угол от оси заряда. Поэтому он пойдет через воздушный промежуток, удаляясь от оси заряда. Если воздушный промежуток имеет правильно подобранную длину, то взрывные газы выйдут в свободное пространство, не передавая детонации другой части заряда.

Может быть поставлена также задача иного рода. Линейный заряд, передающий детонацию, в некотором месте разветвляется на две линии. Необходимо обеспечить передачу детонации по обеим линиям. Однако если детонация идет в обратном направлении только по одной из ответвляющихся линий, то в другое ответвление она передаваться не должна.

В этом случае практика уже давно подсказала следующее, в общем, очень простое решение. Необходимо разветвляющиеся линейные заряды после их раздвоения расположить под сравнительно малым углом друг к другу или провести на некотором отрезке их параллельно друг другу. При этом расстояние между линейными зарядами должно быть подобрано так, чтобы при детонации одного из них другой заряд отбрасывался взрывными газами в сторону, но без передачи детонации.

Надежное решение в этом случае обеспечивается при введении легкой преграды между зарядами (деревянная планка, прослойка грунта и т. п.).

Особый вопрос составляет возможность передачи детонации осколком, брошенным силой взрыва. Исследования показывают, что осколок из твердого и прочного вещества может надежно вызвать детонацию заряда, если его скорость составляет не менее четверти скорости распространения детонации в соответствующем взрывчатом веществе, а размеры не меньше диаметра заряда из этого вещества, в котором может устойчиво передаваться детонация.

Необходимо подчеркнуть, что условия возникновения детонации во всех взрывчатых веществах не могут быть выражены достаточно определенно и однозначно. Если передача детонации осуществляется без значительного запаса надежности, то вероятность ее появления находится где-то между единицей и нулем, причем

условия могут изменяться существенно, в то время как вероятность хотя тоже изменяется, но остается далекой и от единицы и от нуля.

ВЗРЫВ КАК ДВИГАТЕЛЬ

Типичным и широко распространенным использованием взрыва на практике является его применение как теплового двигателя для выполнения различных видов механической работы:

— деформация различных изделий (штамповка, создание камуфлетных полостей и т. д.);

— разрушение, дробление, измельчение различных веществ и материалов (взрывные работы при строительстве и в горном деле);

— перемещение больших масс, главным образом грунтов и горной породы (строительство каналов, плотин и т. п.).

Основной особенностью использования взрыва как теплового двигателя является компактность всей системы, резко отличающейся своей простотой и дешевизной от других вариантов тепловых машин. Прежде всего источником энергии в рассматриваемом случае является взрывчатое вещество, в котором имеются все компоненты, необходимые для получения энергии. Взрыв может быть проведен в любой среде — в атмосфере, в грунте, в воде, в космосе. Для него не нужно атмосферного воздуха, как для паровых двигателей или двигателей внутреннего сгорания. При взрыве выделение энергии неразрывно связано с образованием рабочего тела — взрывных газов. Взрывные газы передают свою энергию обрабатываемому материалу непосредственно без многочисленных промежуточных деталей и звеньев, которые передают и преобразуют энергию и, как правило, приводят к различным потерям энергии.

По-видимому, простота и непосредственность в процессе передачи энергии при взрывных работах должны быть оценены особенно положительно не с точки зрения увеличения коэффициента полезного действия и экономии энергии, а с точки зрения возможности максимального упрощения организации и обеспечения проводимых работ. Взрыв позволяет в ряде случаев достигать огромного повышения производительности труда. В ка-

честве примера можно привести создание гидротехнических плотин с помощью перемещения масс грунта направленным взрывом с максимальным использованием действия сил земного тяготения. В частности, таким способом были созданы плотины на Тереке, в ущелье Медео, вблизи столицы Казахстана города Алма-Аты, на реке Вахше в Таджикистане, построена транспортная дамба в долине Ак-Су в Дагестане и многие другие объекты.

Особенно четкие экономические характеристики получены при возведении направленным взрывом плотины на Байпазинском гидроузле на реке Вахше. Этот узел позволил оросить огромные сельскохозяйственные территории в Яванской и Обикинской долине и обеспечить водой громадный химический комбинат в Яване, куда проведена железная дорога от Термеза.

Обычные способы возведения плотин, использованные при сооружении плотины в Байпазе, привели бы к необходимости иметь множество автомашин, экскаваторов, тракторов. Строительство должно было в лучшем случае продолжаться три года. Необходимо было построить крупный поселок для рабочих, создать большой автопарк и т. д. Все это привело бы к расходам порядка 37 млн. руб., не говоря уже о трудностях по набору квалифицированных рабочих.

Применение взрыва позволило принципиально изменить всю организацию работ. Прежде всего существенно уменьшилась потребность в рабочих кадрах. Несколько десятков горняков и взрывников подготовили взрыв в течение всего четырех месяцев. Они выполнили штольни и взрывные камеры, обеспечили зарядание камер взрывчатым веществом и прокладку электровзрывной сети. Работы эти выполнялись настолько производительно, что заработок рабочих доходил до 10—12 руб. в сутки.

Учитывая стоимость взрывчатого вещества и все другие расходы, оказалось, что общая стоимость взрыва была несколько меньше одного миллиона рублей. Таким образом, экономия характеризуется уменьшением расходов примерно в 40 раз и времени строительства примерно в 9 раз. Приводя эти числа, следует подчеркнуть, что очень трудно назвать другие области техноло-

гни, где можно было бы достигнуть таких рекордов в повышении производительности труда.

Таким образом, можно утверждать, что применение взрыва как теплового двигателя, несмотря на многовековую историю развития взрывного дела, только в последние годы стало раскрывать свои реальные возможности. Успехи оказались результатом того, что действием взрыва стали заниматься физики, механики и математики. Ученые уделили серьезное внимание физико-техническим принципам газовой динамики при высоких концентрациях энергии.

Переходя к более детальному рассмотрению взрыва как теплового двигателя, следует напомнить, что коэффициент полезного действия такого двигателя зависит в первую очередь от температуры рабочего тела. С этой точки зрения взрыв существенно превосходит другие тепловые двигатели, что обусловлено простотой принципиальной схемы действия взрыва.

В других тепловых двигателях рабочее тело содержится и перемещается в различных емкостях и коммуникациях. Очевидно, что материал этих емкостей и коммуникаций должен сохранять свою высокую прочность при температуре рабочего тела. Это, как правило, очень ограничивает температуры рабочего тела.

При применении взрыва эти ограничения отсутствуют и температура рабочего тела зависит только от концентрации энергии в применяемом взрывчатом веществе. Эта температура достигает в практических условиях примерно 3000° . Она существенно превосходит все, что может быть создано в тепловой энергетике, включая ракетную технику и атомные энергетические реакторы.

При исследовании взрыва как теплового двигателя менее ясен вопрос о конечной температуре взрывных газов, другими словами, вопрос о температуре холодильника, которая, как известно, из технической термодинамики также учитывается при расчете теоретического коэффициента полезного действия теплового двигателя. Однако эта сторона задачи имеет менее существенное значение, чем вопрос о температуре нагревателя рабочего тела.

Существует много трудностей. В частности, велики потери энергии, вызванные тем, что давление взрывных

газов в начальный момент их возникновения также очень велико. Такое большое давление вызывает много побочных ненужных процессов, от которых нельзя избавиться.

Другой источник трудностей заключается в кратковременности действия взрыва, связанной с очень большими скоростями перемещения масс. При очень быстрых перемещениях и деформациях возникают во многих случаях значительные силы вязкого сопротивления. Эти силы можно было бы существенно уменьшить при уменьшении скоростей и увеличении времени процессов действия взрывных газов. В некоторых случаях в этом направлении можно достигнуть положительных результатов. Однако трудности, вызванные кратковременностью действия взрыва, пока не преодолены и пути их преодоления еще не выявлены полностью.

ЭЛЕКТРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

В отличие от явлений, связанных со взрывом в грунтах и горных породах, предназначенным для разрушения и перемещения, процессы, связанные с электрическим действием мощных газодинамических процессов, оставались до последнего времени малоизученными и не нашли пока практического применения. Между тем эти явления достаточно разнообразны и могут быть обнаружены простейшими средствами.

Рассмотрим некоторые простейшие опыты. Пусть имеется броневая плита, установленная на изоляторах и расположенная горизонтально. Эта плита соединена через осциллограф с соответствующим заземлением. Над броневой плитой можно подвесить в воздухе заряд тротила весом около 1 кг. При взрыве осциллограф регистрирует повышение потенциала броневой плиты по сравнению с Землей на величину порядка тысячи вольт. Повышение потенциала, получаемое описанным путем, сильно зависит от формы заряда и места расположения детонатора. Чем ярче выражено направленное движение потока взрывных газов, тем выше потенциал, получаемый на броневой плите. Этот эксперимент имеет нечто общее с выстрелом из обычной пушки. При выстреле ствол пушки в результате истечения из него рас-

каленных пороховых газов приобретает значительный электрический потенциал по отношению к Земле.

Всякий взрыв, производимый в воздухе, вызывает систему электромагнитных волн, которые могут быть зарегистрированы при помощи приемника с штыревой антенной и регистрацией осциллографом.

Пьезоэлектрические эффекты возникают также при движении взрывных волн в грунтах и горных породах. Существенное значение при изучении разрушений горных пород взрывом может иметь изучение электропроводности этих пород. Здесь имеет значение то, что возникновение каждой новой трещины сопровождается разрушением электронных оболочек атомов и молекул и освобождением свободных электронов. Если разрушаемый образец находится при этом в электрическом поле, то электроны смещаются и возникает импульс электрического тока в разрушаемой породе.

Электрические явления, возникающие при взрыве и сопровождающие взрыв, представляют собой широкую область, где бесспорно существуют возможности для теоретических и экспериментальных исследований, раскрывающих основные принципы и законы. С другой стороны, несомненно электровзрывные процессы скрывают в себе интересные практические перспективы, в частности, в области контроля за протеканием процесса воздействия взрыва на обрабатываемый материал, контроля полноты детонации и решения многих других задач.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗРЫВЕ

В настоящее время широко развиваются исследования физико-химических процессов, возникающих под действием ударных волн, воздействующих на различные вещества. Детальный обзор результатов и перспектив в этой области требует освещения многих специальных вопросов, выходящих за пределы темы этой брошюры. Поэтому здесь следует подчеркнуть содержательность и перспективность изучения физико-химических процессов, создаваемых действием взрыва или обусловливаемых действием газов при высоких давлениях, температурах и скоростях, хотя бы эти газы не были продуктами взрыва.

Целесообразно остановиться на принципиально более простых явлениях, в которых особенно ясно сказываются определяющие особенности взрывного воздействия на вещество.

Рассмотрим подробнее опыт по обжатию взрывом железного стержня. В этом опыте взрывные газы, возникшие при детонации тротила, обжимали давлением порядка сотни тысяч килограмм на квадратный сантиметр цилиндрический стержень из мягкого железа. Давление было существенно выше предела упругости железа, и в течение короткого времени металл находился в состоянии вязкого течения и испытал заметное смещение по отношению к своей первоначальной форме. Взрывные газы, действующие на металл, имели температуру порядка 3000° . Это значит, что газы были сильно ионизированы. Как уже указывалось, во взрывных газах тротила имеется много неокисленного углерода. Следует учитывать, что известная часть атомов углерода была во взрывных газах сильно ионизирована. Это значит, что ионы углерода, лишенные внешней электронной оболочки, имели минимальные размеры и высокую подвижность. Эти предпосылки позволяют достаточно легко предвидеть результат рассматриваемого эксперимента.

Исследование металла, обжатого взрывом стержня, показало, что мягкое железо превратилось в сталь, точнее говоря, приобрело определенную структуру, называемую в металлургии мартенситом. Эта структура охватывает все сечение стержня. В течение весьма небольшого времени ионы углерода проникли в достаточном количестве в железо на глубину порядка 5 мм.

Проникание ионов углерода внутрь стержня можно представить так. При воздействии высокого давления взрывных газов стержень стал сжиматься, испытывая интенсивную пластическую деформацию. После этого внешнее давление быстро снизилось и стержень за счет некоторого количества запасенной в нем энергии стал расширяться. Именно в момент его интенсивного расширения ионы углерода быстро диффундировали внутрь железа, были как бы засосаны в растянутую кристаллическую решетку металла.

Конечно, в этом кратком и схематизированном описании не раскрывается детально физико-химическая и динамическая картина явления. Однако и сказанного

вполне достаточно, чтобы составить себе представление о весьма перспективных и своеобразных явлениях, которые обнаруживаются при действии взрывных газов на некоторые вещества.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ

Общеизвестным, классическим случаем взрыва следует считать такой, при котором энергия взрыва запасена заранее в потенциальной форме внутри взрывающегося заряда. Однако это не единственно возможная разновидность взрыва. Возможны такие взрывы, при которых энергия в течение весьма малого времени привносится во взрываемое вещество из некоторого запаса, накопленного в другом месте.

Характерным примером такого взрыва является конденсированный электрический разряд электрического конденсатора, заряженного до высокого электрического потенциала. При этом кратковременный импульс электрического тока возникает в результате пробоя искрой воздушного промежутка или иного диэлектрика.

Возможен также электрический взрыв, происходящий за счет разогрева и быстрого испарения тонкой проволоочки, по которой пропускается электрический разрядный ток.

Принципиальной особенностью электрического взрыва является возможность нагнетания весьма значительной энергии в очень небольшую массу вещества. Это открывает возможность достигать очень высоких концентраций энергии, которая выражается весьма высокой температурой. При этом возникает облако продуктов взрыва, содержащее огромное количество ионизированных атомов и свободных электронов.

Электрические разряды как особая форма взрыва широко применяются как средство развязывания взрыва обычных взрывчатых веществ. Они используются в электродетонаторах, и их следует считать трудно заменяемым средством управления взрывом при помощи электрических импульсов.

Кроме этого, электрические разряды как особая форма взрыва обладают многими другими достоинствами. Электрический взрыв реализуется без необходимости

иметь запасы взрывчатого вещества, хранение и транспорт которого связаны с необходимостью соблюдать правила техники безопасности. Электрические взрывы могут быть осуществлены быстро и в значительном количестве.

Электрические разряды широко используются для практических целей при штамповке различных мелких изделий. При этом разряд проводится в жидкости (вода, масло), и жидкость заменяет собой металлический штамп; форма изделия определяется формой матрицы, в которую вдавливается штампуемое изделие.

Электрические взрывы, создающие высокотемпературное и сильно ионизированное облако взрывных газов, позволяют проводить содержательные эксперименты общетеоретического характера. В частности, можно отметить эксперименты по действию высокотемпературных взрывных газов на различные вещества.

Эти эксперименты осуществляются довольно просто. Электрический взрыв действует на тело, укрепленное на маятнике. Отклонение маятника дает возможность определить величину импульса, полученного телом. Чем больше отклонение маятника, тем больше полученный при взрыве импульс.

Интересной особенностью действия высокотемпературных взрывных газов электрического взрыва является то, что вещество на поверхности воспринимающего взрыв тела плавится и испаряется. Возникающие при испарении газы расширяются и своим давлением заметно повышают импульс, производимый взрывом.

В газе, имеющем настолько высокую температуру, что в нем содержится много ионизированных атомов и свободных электронов, основная часть тепловой энергии переносится и передается электронами. Поэтому при действии на любое тело расширяющихся высокотемпературных газов основная часть тепловой энергии передается телу с помощью электронной бомбардировки. Если тело, воспринимающее эту бомбардировку, обладает высокой электропроводностью и хорошо заземлено, отрицательный электрический заряд, переносимый электронами, сжимается с этого тела и не возникает препятствий для дальнейшего протекания электронной бомбардировки и развития испарения (эрозии) поверхностного слоя, бомбардируемого электронами тела.

Если же тело, на которое воздействует высокотемпературный газ, является диэлектриком, то бомбардирующие его электроны остаются на поверхностном слое тела и создают электрическое поле, которое не подпускает близко к телу дальнейшие потоки электронов. Электроны тормозятся электрическим полем, отбрасываются назад, передают при этом свой импульс телу, но не могут произвести разрушения поверхностного слоя. Поэтому реактивный эффект газов, возникающих при испарении (эрозии) поверхностного слоя, не возникает. Наблюдения показывают, что общий импульс, передаваемый диэлектрику высокотемпературным газом, существенно меньше, что подтверждает правильность теоретической картины.

Опыты показывают также, что такие хорошие проводники электричества, как металлы (например, медь), подвергаются при воздействии высокотемпературных газов электрического разряда очень сильной эрозии и получают в соответствии с этим значительный механический импульс, несмотря на высокую температуру испарения. В отличие от металлов такой легко испаряющийся и сгорающий материал, как парафин, не подвергается заметной эрозии и получает соответственно уменьшенный механический импульс.

Все эти сравнительно простые явления до последнего времени не изучались более подробно, хотя, несомненно, мы имеем здесь легко реализуемые пути широкого развития эксперимента и теории, которые должны повысить стойкость различных машин, где действуют высокотемпературные газы. В частности, здесь открываются интересные возможности повышения ресурса лопаток газовых турбин, широко применяемых в авиации и имеющих все данные для проникновения в транспортную и энергетическую технику на Земле.

ВЗРЫВ ПРИ УДАРЕ

При достаточно высоких скоростях движения любое тело, встречающее преграду, взрывается и взрывообразно разрушает некоторый объем преграды. Скорость, необходимая для получения такого эффекта, зависит от прочности движущегося тела и встречаемой

им преграды. На основе простого расчета можно установить, что скорость, обеспечивающая взрыв при ударе, должна быть пропорциональна скорости звука, умноженной на коэффициент, являющийся отношением временного сопротивления на раздавливание к модулю упругости соответствующего вещества. Модулем упругости, как известно, называется давление, деленное на относительную деформацию, которую оно создает. Как правило, можно считать, что для большинства твердых тел скорость, обеспечивающая разрушение, составляет несколько километров в секунду.

Характерным явлением природы, связанным с взрывом, является удар метеоритов о поверхность небесных тел. В земных условиях такое явление является весьма редким потому, что земная атмосфера сильно тормозит метеорные тела и в большинстве случаев они сгорают или даже взрываются в атмосфере, не доходя до поверхности Земли.

Тем не менее на поверхности Земли сохранилось немало кратеров, возникших в прошлые века от взрывов метеоритов больших размеров, дошедших до поверхности земли с достаточно высокой скоростью. Можно назвать хорошо известные и детально изученные метеорные кратеры в Эстонии, на острове Саарема (на Балтийском море). На территории США известен огромный кратер в штате Аризона. Интересно отметить, что в массе метеоритов нередко встречается свободный углерод. При очень сильных ударах некоторая доля этого углерода превращается в микроскопические алмазы. Эти явления обусловлены действием весьма высокого давления, возникающего в результате удара.

Применяя известный радиоуглеродный метод, можно на основе анализа этих микроалмазов установить время, прошедшее после момента удара. Такой анализ приводит в ряде случаев к весьма интересным данным, помогающим восстанавливать историю эволюции Солнечной системы.

Интересные результаты дает изучение удара о достаточно жесткие преграды (сталь) металлических тел, имеющих определенные геометрические формы. От места первоначального контакта с преградой в этих случаях распространяется интенсивная ударная волна по всему ударяющему телу. Эта волна может иметь та-

кую высокую интенсивность, что разрушает на мелкие осколки материал.

В среде преграды, воспринимающей удар движущегося тела, также возникает волна напряжений и деформаций, которая создает множество дальнейших явлений разрушения преграды, изменения ее физических и химических свойств. В основном совокупность явлений в преграде весьма близка к явлениям, которые возникли бы в ней при взрыве в месте удара заряда с энергией взрыва, равной кинетической энергии ударяющегося тела.

Явления, связанные с ударом, возникающим при больших скоростях движения, пока еще не нашли достаточно широкого применения на практике. Однако не подлежит сомнению, что такие явления могут и должны найти широкое применение, например, при высокоскоростной ковке металлов.

Рассмотренные здесь случаи удара на весьма высоких скоростях приводят к взрывообразному разрушению ударяющегося тела и некоторого объема преграды, воспринимающей удар. Это разрушение подчиняется определенным закономерностям, однако в значительном числе случаев пока еще не найдено возможностей для технического использования этих закономерностей.

Впрочем, есть один из вариантов сильного удара, когда соударяющиеся массы испытывают незначительное и закономерное разрушение, которое используется со значительным практическим эффектом. Дело идет о сварке пластин различных металлов, свариваемых друг с другом при помощи взрыва. Одна из этих пластин помещается горизонтально на массивном основании, другая — над ней, на некотором расстоянии так, что образует небольшой угол с нижней плитой. Верхняя плита загружается соответствующим слоем взрывчатого вещества. При взрыве этого вещества верхняя плита получает высокую скорость и со значительной силой ударяет по нижней плите. В результате такого соударения происходит сварка этих плит по всей поверхности взаимного соударения. Самым существенным в этом процессе является следующее. Если плиты соударяются так, что между ними при их сближении имеется некоторый угол α , то через свободное пространство, обусловленное существованием этого угла, выбрасываются в форме тон-

кой плоской струи поверхностные слои обеих соударяющихся плит. Толщина этих слоев очень невелика. Она равна

$$b = B \frac{1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2}.$$

Здесь B — толщина соответствующей плиты. Входящий в эту формулу угол α определяется с учетом действия взрыва потому, что при взрыве угол наклона метаемой взрывом плиты может несколько измениться. Если, например, $\alpha = 10^\circ$, то толщина сбрасываемого слоя составляет примерно одну сотую долю толщины плиты. Поэтому потеря материала свариваемых плит совершенно ничтожна.

Вместе с тем описанное удаление поверхностных слоев имеет огромное технологическое значение потому, что в поверхностном слое обычно сосредоточиваются загрязнения и окислы, препятствующие хорошему контакту свариваемых веществ. Непосредственный контакт материалов обеих плит осуществляется, таким образом, по вновь возникшей поверхности, которая не соприкасалась с атмосферным воздухом и не засорена какими бы то ни было посторонними включениями. Этот результат является чрезвычайно важным для обеспечения высшего качества сварки, недостижимого никакими другими средствами. Так, в рассмотренных условиях определенным образом организованное взаимное разрушение соударяющихся тел приобретает особо важное практическое значение.

По-видимому, это явление может быть использовано не только при взрывной сварке плоских плит, но и в других разновидностях сварки взрывом.

При сильных ударах имеется немало и других явлений, которые оказываются необычными и, несомненно, при более детальном их изучении приведут к различным интересным для практики выводам. Например, в последнее время удалось заметить, что при сильном ударе происходит испускание рентгеновских лучей. Известно также генерирование мощного ультразвукового излучения и электромагнитных волн различной частоты. Все это должно рассматриваться как импульс для дальней-

ших исследований в области эксперимента, теории и отыскания всевозможных практических приложений.

ВЗРЫВАЮЩИЙСЯ ВОЗДУХ

Обычный атмосферный воздух при определенных условиях может стать источником ударной волны, аналогичной волнам, возникающим при взрыве зарядов взрывчатого вещества определенной формы. Такие волны в воздухе возникают при движении любого тела, имеющего скорость больше скорости звука.

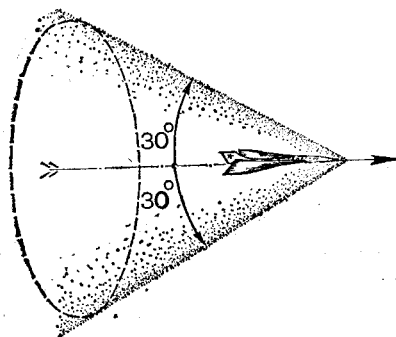


Рис. 6. Ударная волна зазвукового самолета, летящего со скоростью, в 2 раза превосходящей скорость звука.

В этом случае практически вся энергия, теряемая телом при преодолении сопротивления воздуха, преобразуется в энергию ударной волны. Фронт этой волны имеет форму конуса. Ось этого конуса совпадает с направлением движения тела. Образующие конуса составят с осью угол, синус которого равен отношению скорости звука в воздухе к скорости движения тела. Если, например, тело движется со скоростью, в 2 раза превосходящей скорость звука, то этот угол составляет 30° (рис. 6). Движение с такой скоростью в настоящее время освоено авиацией. Соответствующая скорость составляет примерно 2500 км в час. С такой скоростью, как известно, летают советские самолеты ТУ-144 и англо-французские «Конкорд». Если сила тяги двигателей самолета равна F , то энергия, затрачиваемая на единицу

длины пути самолета, также равна F . Если разделить F на энергию взрыва одного килограмма тротила U , то мы получим количество тротила, дающего при взрыве такую энергию. Представим себе, что в атмосфере расположен удлиненный заряд, совпадающий с линией полета самолета. Этот заряд может быть изготовлен в виде спирали. Тогда скорость движения детонации вдоль оси спирального заряда может быть сделана равной скорости полета соответствующего самолета и взрыв этого заряда создаст в атмосфере точно такую же волну, какую образует зазвуковой самолет. Можно для примерного расчета принять

$$F = 10 \text{ т} = 0,10^4 \text{ кгс}$$

$$v = 400\,000 \text{ кгс} \cdot \text{м}$$

Тогда получаем следующее количество тротила на 1 м длины заряда

$$\frac{10^4}{400\,000} = \frac{1}{40} \text{ кг/м} = 25 \text{ г/м},$$

или 25 кг на 1 км пути самолета.

Это сравнительно немного. Поэтому опасаться чрезмерно сильного действия ударной волны зазвукового самолета как возможного источника разрушений не приходится.

В ряде капиталистических стран определенные реакционные круги, боровшиеся против введения рейсов зазвуковых самолетов, высказывали опасения относительно чрезмерно сильного действия ударных волн таких самолетов. Однако эти опасения были лишены оснований. Приближенный расчет показывает, что избыточное (по отношению к нормальному атмосферному) давление ударной волны зазвукового самолета примерно равно

$$\Delta P_{\phi} \approx 1000 \frac{\sqrt{F}}{R} \text{ кгс/м}^2.$$

Здесь F_{ϕ} сила тяги двигателей самолета и R —расстояние точки, где определяется давление, от траектории самолета. Если самолет идет на высоте $R = 1 \text{ км} = 1000 \text{ м}$ и сила тяги $F = 10\,000 \text{ кгс}$, то мы получаем

$$\Delta P_{\phi} = 1000 \frac{\sqrt{10\,000}}{1000} = 100 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}.$$

Это одна сотая доля давления атмосферы — давление, соответствующее напору воздуха при ветре, имеющем скорость 20 м/сек. Это довольно сильный, но все же достаточно часто встречающийся ветер. Поэтому можно считать, что давление воздуха, соответствующее такому ветру, вполне допустимо и особых разрушений вызвать не может. Опасения, что зазвуковой самолет может оказаться опасным при полете на очень малой высоте, не выдерживают критики потому, что современные зазвуковые самолеты рассчитаны исключительно на зазвуковой полет на значительной высоте, а при приближении к земле всегда переходят на дозвуковую скорость.

Совершенно другие значения воздушных ударных волн получаются, если дело идет о движении в атмосфере Земли крупных метеоритов, особенно когда они разрушаются в полете и компактная масса летящих осколков встречает особенно сильное сопротивление воздуха.

В этом случае при расчете давления воздушной ударной волны необходимо в формуле, приведенной выше, считать силу F , равной сопротивлению воздуха движению метеорного тела. Если обозначить через S поперечное сечение этого тела и через v его скорость, то приближенно можно считать

$$F \approx \frac{v^2}{10} S.$$

Здесь v выражено в метрах в секунду. Отсюда следует

$$\Delta P \approx 316 \frac{v}{R} \sqrt{S}.$$

Для приближенного расчета можно также написать

$$\Delta P \approx 300 \frac{vD}{R}.$$

D — диаметр тела.

Если применить эту формулу к действию волны крупного метеорита, то можно принять

$v = 10\,000$ м/сек (вблизи поверхности Земли);

$D = 100$ м;

$R = 1000$ м,

Тогда $\Delta P \approx 300\,000$ кгс/м².

Это в 30 раз больше давления атмосферы. Конечно, приведенный расчет приближенный, но он показывает, что крупные метеориты без всякого взрыва, только за счет торможения их атмосферой, могут создавать воздушные ударные волны, которые обладают исключительной разрушающей силой.

Исходя из этого, можно предполагать, что картина разрушений леса, возникшая на месте падения известного Тунгусского метеорита, вызвана не каким-либо особым его взрывом, а просто мощной ударной волной, возникшей при его торможении атмосферным воздухом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой брошюре приведен ряд примеров, показывающих огромное разнообразие явлений, связанных с газовой динамикой высоких скоростей и энергий. Эти явления возникают как в природных процессах, так и при решении различных технических задач. Изучение таких явлений может и должно проводиться на различных уровнях точности научного анализа. Примеры, рассмотренные здесь, показывают, что и при более простом и общедоступном анализе все же возможно выявить и объяснить наряду с простыми фактами такие, которые оказываются новыми и неожиданными. Нет сомнения в том, что по мере дальнейшего развития естествознания и техники количество таких фактов будет быстро расти. Эти факты будут привлекать внимание все более широких кругов человечества и развитие простых, но научно обоснованных путей их анализа будет быстро и широко развиваться.

Георгий Иосифович Покровский

УСПЕХИ ГАЗОДИНАМИКИ

(газовая динамика высоких энергий)

Редактор И. Б. Файнбойм. Обложка Л. П. Ромасенко. Худож. редактор В. Н. Конюхов. Техн. редактор Т. В. Пичугина. Корректор Л. С. Соколова.

А 02408. Индекс заказа 44002. Сдано в набор 14/XI 1973 г. Подписано к печати 4/I 1974 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1.0. Печ. л. 2.0. Усл.-печ. л. 3.36. Уч.-изд. л. 3.31. Тираж 62 620 экз. Издательство «Знание», 101835, Москва, Центр, пр. Серова, д. 3/4. Заказ 2155. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 10 коп.