

# Ударные волны и детонация

Л. БЕЛОПУХОВ

**В** СТАТЬЕ «ВЗРЫВ» ГОВОРИЛОСЬ О ТОМ, ЧТО всякий взрыв обязательно сопровождается образованием ударных волн в пространстве и что ударная волна есть непреходящий элемент детонационного взрывного процесса во взрывающейся газовой (или пылевоздушной) среде и в конденсированном взрывчатом веществе.

## Немного о газовой динамике

Ударные волны – это очень интересное явление природы. Их существование было предсказано многими учеными, в частности знаменитым математиком Риманом. Его имя связано прежде всего с развитием идей своего учителя Гаусса в области геометрии. В 1854 году 28-летний Риман дал общую идею математического пространства, а затем подробно разработал одну из неевклидовых геометрий, с тех пор носящую его имя. Но Риман внес вклад во многие области математики. Так, в работах по теории дифференциальных уравнений он обнаружил (на бумаге) возможность ударных волн. Именно по этому поводу возникло крылатое изречение – «явление возникло на кончике пера теоретика».

Дифференциальные уравнения, которые исследовал Риман, представляют собой математический аппарат науки, которая называется газовой динамикой. Она изучает, как следует из названия, движение воздушных масс, в частности бури и ураганы, течение газа по трубам, движение газа в турбинах и соплах ракетных двигателей и многое другое.

Основным газодинамическим уравнением является закон Ньютона, примененный к элементу газовой среды (в этом случае оно называется уравнением Эйлера). Но поскольку элемент газа при движении изменяет свою плотность, а часто и температуру, то кроме силовых необходимо использовать и энергетические (термодинамические) уравнения.

Одним из простых следствий решений системы уравнений газовой динамики является волновое уравнение, в котором скорость волны для идеального газа зависит только от температуры. Это – звуковые волны, т.е. продольные колебания элемента газа. Скорость звука равна

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где  $T$  – абсолютная температура,  $M$  – молярная масса,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\gamma$  – показатель адиабаты, равный отношению теплоемкостей при постоянном давлении и постоянной температуре. Для воздуха при температурах меньше 1000 К показатель адиабаты равен 1,4. Скорость звука при этом равна

$$v = 20\sqrt{T} \text{ (м/с)},$$

что дает для стандартных условий 342 м/с.

Если же учитывать неидеальность газа, возможность высоких температур, при которых показатель адиабаты непостоянен и выражается сложной функцией параметров состояния, то система газотермодинамических уравнений становится довольно сложной.

Поскольку газовая динамика не интересуется отдельными атомами или молекулами, а рассматривает элемент газа, который в теории может быть бесконечно малой величиной, то в дифференциальных уравнениях газовой динамики и в их решениях все параметры состояния – непрерывные функции координат и времени. Но в 1860-е годы Риман показал, что существует особое решение системы газотермодинамических уравнений. Не общее решение, методы получения которого он разрабатывал, и не частные решения, которые вытекают из общего решения при использовании начальных и граничных условий, а именно особое решение, которое нельзя получить стандартными математическими методами. Это особое решение представляет собой разрыв функций давления, плотности и скорости движения среды, т.е. мгновенный, не имеющий ширины скачок параметров. Этот скачок и получил название ударной волны.

Слово «волна» не совсем точно передает характер явления, поскольку в обычном понимании волна характеризуется периодичностью, частотой, а скачок – это однократное резкое изменение. Правильнее было бы назвать явление ударным импульсом.

## Возникновение ударной волны

Образование ударной волны проще всего представить на примере плоского движения газа в трубе, в которую вдвигается ускоряющийся поршень. Когда поршень приходит в движение и начинает перемещать и сжимать прилегающий к нему слой газа, известие об этом событии (повышении давления и плотности) распространяется в газе со скоростью звука. В газе возникает «кусочек» волны сжатия (четверть волны) с

непрерывным распределением параметров (рис.1,а). Но повышение давления и плотности соответствует повышению температуры. Это означает, что скорость звука за началом (фронтом) волны сжатия непрерывно увеличивается, достигая максимума на границе газа с

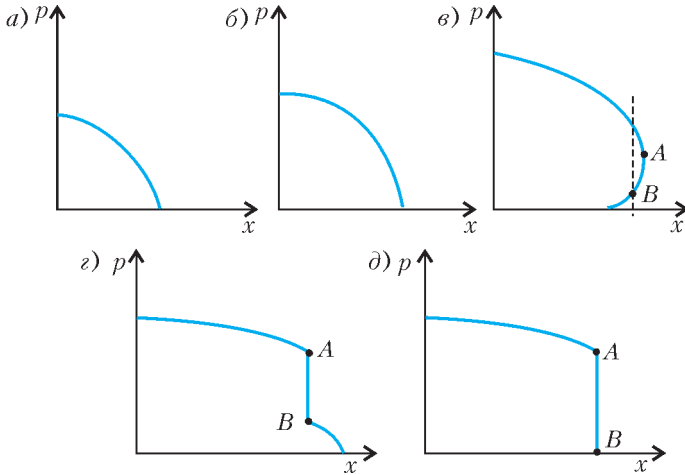


Рис.1. Профиль давления в трубе ( $p$  – давление,  $x$  – расстояние от поршня)

поршнем. Поэтому по мере движения поршня и увеличения его скорости возмущения от него с известием о возрастании давления и плотности догоняют переднюю часть волны сжатия и усиливают ее (рис.1,б).

Со временем форма волны сжатия изменяется. Это происходит по двум причинам. Во-первых, как уже говорилось, в волне непрерывно увеличивается температура, следовательно, увеличивается и «местная» скорость звука. А во-вторых, скорость звука складывается со скоростью поршня, которая также непрерывно увеличивается. Профиль волны становится совершенно непохожим на четверть синусоиды (рис.1,в). Кажется бы, участок волны с давлением  $p_A$  сможет даже перегнать участок с давлением  $p_B$ . Но эта ситуация абсурдна, ибо в одной точке  $x$  не может быть двух разных давлений.

Развитие волны сжатия будет происходить по другому сценарию. Сначала может появиться вертикальная касательная (рис.1,г), а потом и полноценный скачок – ударная волна (рис.1,д). Естественно, что скорость перемещения разрыва, т.е. скорость ударной волны, больше скорости звука в невозмущенном газе и больше скорости движения газа (но не звука) за фронтом волны.

Во времена Римана термодинамика еще только создавалась, и он изучал не конкретные уравнения, в которые входят параметры газа (например, показатель адиабаты), а математические методы нахождения решений систем уравнений, похожих на уравнения газовой динамики. И математика подсказала возможность особого решения – скачка параметров. Но ученые, развивавшие газовую динамику, не верили в то, что такие скачки могут реально существовать в природе – мало ли что могут показать математические «игры». Кажется, и сам Риман был в числе сомневающихся.

Сто лет назад проверить наличие ударных волн

экспериментом было невозможно – соответствующие приборы не имели необходимого разрешения по времени и могли зафиксировать только усредненные величины. Но внезапный и сильный звук при грозе или взрывах приводил к мысли о существовании этого явления. Выявлены были и другие скачки – например, внезапный переход некоторых магнетиков из парамагнитного состояния в ферромагнитное и иные так называемые фазовые переходы второго рода, в которых характеристики вещества меняются скачкообразно. Примером скачка может служить и резкое изменение характера излучения энергичных электронов системы, когда их концентрация достигает определенной величины (лазеры и мазеры). И все это разрешено фундаментальными законами природы.

### Уравнение Гюгонио

Приведенное рассмотрение механизма образования ударных волн при всей его элементарности было сделано только в начале XX века и тогда же было найдено соотношение между параметрами состояния до и после разрыва. Для этого оказалось достаточно использовать закон Ньютона, закон сохранения энергии (первое начало термодинамики) и условие отсутствия местных скоплений газа (закон непрерывности массы), или, другими словами, закон постоянства расхода газа, отнесенного к площади сечения трубы. Эти уравнения легко написать. Сделаем это.

Один и тот же элемент газа до ударной волны имеет массу  $\rho_0 V_0 = \rho_0 S v_0 \Delta t$ , где  $\rho_0$  и  $v_0$  – плотность и скорость движения этого элемента,  $S$  – сечение трубы,  $\Delta t$  – время прохождения элемента газа через фронт волны, а за фронтом волны его масса равна  $\rho S v \Delta t$  ( $\rho$  и  $v$  – параметры газа за фронтом).

Запишем закон Ньютона в виде

$$\Delta F = \frac{mv - m_0 v_0}{\Delta t}.$$

Поскольку

$$\Delta F = \Delta p S = (p_0 - p) S,$$

имеем

$$p - p_0 = \rho_0 v_0^2 - \rho v^2.$$

Закон сохранения энергии в данном случае совпадает с законом Бернулли:

$$u_0 + \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{v_0^2}{2} = u + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2},$$

где  $u_0$  и  $u$  – внутренние энергии элемента газа, в расчете на единицу массы, до и после фронта волны.

Закон непрерывности массы можно записать в виде

$$\rho_0 S v_0 \Delta t = \rho S v \Delta t, \text{ или } \rho_0 v_0 = \rho v.$$

Для идеального газа

$$u_0 = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p_0}{\rho_0}, \quad u = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho}.$$

Из написанных уравнений несложно получить такое соотношение:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{(\gamma + 1)\rho - (\gamma - 1)\rho_0}{(\gamma + 1)\rho_0 - (\gamma - 1)\rho}.$$

Это соотношение можно упростить, если учесть, что для воздуха (двухатомный газ)  $\gamma = 1,4$ , и перейти от плотностей к удельным объемам:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{6 - \frac{V}{V_0}}{6 \frac{V}{V_0} - 1}.$$

Два последних выражения называют уравнением Гюгонио (в честь французского ученого, получившего их в 1903 году), а соответствующие графики – адиабатой Гюгонио.

На рисунке 2 представлены (в полулогарифмическом масштабе) три кривые: кривая 1 соответствует изотермическому процессу, кривая 2 – адиабатическому (для воздуха), кривая 3 – это адиабата Гюгонио. При не очень сильном сжатии, например в 2 раза, соответствующие значения относительного давления немного отличаются друг от друга и составляют 2; 2, 7 и 2, 75. Но когда относительное сжатие равно 6, то соответствующие значения для относительного давления составляют 6; 12, 3 и... бесконечность. Согласно ударной адиабате, при сильном (почти шестикратном) сжатии давление в ударной волне может скачком возрасти до огромной величины. А это значит (в соответствии с уравнением состояния), что до огромной величины может подскочить и температура.

При обычном адиабатическом сжатии в 5,75 раза абсолютная температура возрастает в 2, 45 раза – по уравнению адиабаты  $\frac{T}{T_0} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\gamma-1}$ . А по уравнению Гюгонио температура увеличивается в 23,3 раза – от 300 К до 6990 К, что выше температуры излучающего слоя Солнца (6000 К).

При ядерном взрыве образуется сильная ударная волна, в которой давление возрастает в 1000 и более раз. Температура при этом, согласно уравнению Гюгонио, возрастает в 167 раз! Правда, более точные расчеты приводят к увеличению температуры в этом случае «всего» в 47 раз, т.е. до 14000 К. Ударная волна выглядит при этом как сверхраскаленный (огненный) шар, который ярче Солнца в 1000 раз. (При этом расчете нужно учесть, что энергия излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры, а огненный шар видится на расстоянии 10 км от ядерного взрыва под углом в 5,3 раза больше, чем солнечный диск). Вот почему первая в мире популярная книга о ядерных взрывах (американского ученого Р.Юнга) имела название «Ярче тысячи солнц».

При ядерном взрыве образуется сильная ударная волна, в которой давление возрастает в 1000 и более раз. Температура при этом, согласно уравнению Гюгонио, возрастает в 167 раз! Правда, более точные расчеты приводят к увеличению температуры в этом случае «всего» в 47 раз, т.е. до 14000 К. Ударная волна выглядит при этом как сверхраскаленный (огненный) шар, который ярче Солнца в 1000 раз. (При этом расчете нужно учесть, что энергия излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры, а огненный шар видится на расстоянии 10 км от ядерного взрыва под углом в 5,3 раза больше, чем солнечный диск). Вот почему первая в мире популярная книга о ядерных взрывах (американского ученого Р.Юнга) имела название «Ярче тысячи солнц».

При ядерном взрыве образуется сильная ударная волна, в которой давление возрастает в 1000 и более раз. Температура при этом, согласно уравнению Гюгонио, возрастает в 167 раз! Правда, более точные расчеты приводят к увеличению температуры в этом случае «всего» в 47 раз, т.е. до 14000 К. Ударная волна выглядит при этом как сверхраскаленный (огненный) шар, который ярче Солнца в 1000 раз. (При этом расчете нужно учесть, что энергия излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры, а огненный шар видится на расстоянии 10 км от ядерного взрыва под углом в 5,3 раза больше, чем солнечный диск). Вот почему первая в мире популярная книга о ядерных взрывах (американского ученого Р.Юнга) имела название «Ярче тысячи солнц».

## Физика ударной волны

Но есть еще одно важнейшее отличие ударного сжатия от изотермического или адиабатического. Если снять давление за фронтом ударной волны (например, тем или иным способом вернуть поршень в начальное положение), то газ после разгрузки не вернется в исходное состояние с параметрами  $p_0$ ,  $\rho_0$ ,  $T_0$ . Ударное сжатие – процесс необратимый. При расширении сжатого в ударной волне газа не может образоваться ударная волна расширения. Давление и плотность газа и убегающего назад поршня будут уменьшаться, и информация об этом не будет накапливаться, как в случае сжатия, поскольку скорость звука теперь около поршня меньше, чем вдали от него, где температура еще не успела понизиться. Поэтому ударный фронт быстро «размоется», скачок исчезнет, и переход сжатого газа в исходное состояние будет происходить обычным адиабатическим путем. А это значит, что если плотность газа и объем вернуться к первоначальным значениям (масса газа не изменится), то давление газа будет больше исходного (рис.3). Больше будет и его температура.

Таким образом, процесс «ударное сжатие – адиабатическое расширение» приводит к необратимому нагреву газа. Это означает, что работа, затраченная на ударное сжатие газа, не компенсируется работой газа при его расширении. Часть работы «застревает» в газе, как при всяком необратимом процессе. Адиабата Гюгонио не является графиком обратимого процесса, а просто отражает соотношение параметров газа до и после ударного скачка. При ударном сжатии физический смысл имеют только две точки ударной адиабаты – начальная и конечная. Можно сказать, что ударная адиабата – это геометрическое место точек на графике зависимости давления от удельного объема (или об плотности), достижимых путем ударного сжатия газа из данного начального состояния.

А как изменится газодинамическая теория, если учесть реальность молекулярной структуры газа? При этом придется учитывать передачу энергии и импульса от одних молекул к другим за фронтом волны, т.е. так называемые нестационарные явления переноса. Кроме газодинамических уравнений нужно будет учесть и уравнения нестационарной термодинамики – уравнения вязкости (передачи импульса) и теплопроводности (передачи кинетической энергии). Эта более сложная задача принципиально решается, хотя аналитическое решение возможно лишь для некоторых упрощенных случаев. В результате решения можно определить толщину ударного фронта, который уже не будет разрывом в математическом смысле. Для не очень сильных ударных волн эта толщина оказывается по-

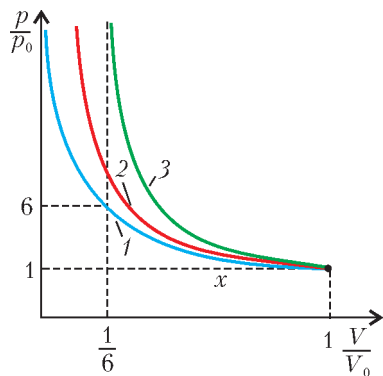


Рис.2. Изотерма (1), адиабата (2) и адиабата Гюгонио (3)

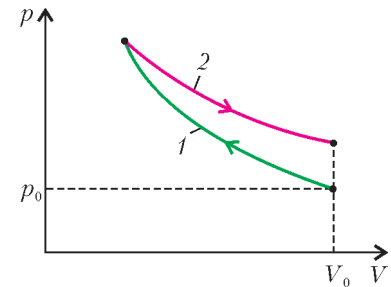


Рис.3. Адиабата Гюгонио (1) и адиабата разгрузочного процесса (2)

рядка нескольких длин свободного пробега молекул в невозмущенном газе ( $\sim 10^{-6}$  м), а в пределе с увеличением интенсивности волны стремится к одной длине свободного пробега ( $\sim 10^{-7}$  м).

Молекулярно-кинетическая теория ударных волн вносит поправки и в адиабату Гюгонио, точнее в величину показателя адиабаты  $\gamma$ . С учетом колебательного движения атомов в двухатомных молекулах для воздуха  $\gamma = 9/7 \approx 1,286$ . Соответственно, уравнение адиабаты Гюгонио принимает вид

$$\frac{p}{p_0} = \frac{8 - \frac{V}{V_0}}{8 \frac{V}{V_0} - 1},$$

а предельно возможное сжатие в волне для идеального газа получается уже не 6, а 8.

### Как возникают ударные волны?

Кроме разобранный примера движения поршня в трубе, удобного для теории (одномерная задача), ударные волны возникают во многих случаях сверхзвуковых движений. Например, при сверхзвуковом истечении газа из ракетного сопла внутри него, недалеко от выхода, возникает скачок давления. При сверхзвуковом движении какого-либо тела в воздухе (например, самолета) оно действует на воздух, как поршень, и в воздухе возникает коническая ударная волна, сопровождающая летящее тело. Если такая ударная волна достигает поверхности земли, то она может произвести разрушительный эффект (поломку крыши, разрушение оконных рам и стекол и т.п.). Поэтому переходить от дозвуковой скорости к сверхзвуковой (преодолевать «звуковой барьер») самолетам разрешается только на определенной высоте, когда интенсивность сопровождающей самолет ударной волны при достижении земной поверхности ослабевает до безопасной величины. Человек при этом слышит резкий звук с раскатами, очень похожий на звук при взрыве.

Самый же распространенный случай возникновения ударных волн – это взрывы. Ударные волны сопровождают все виды взрывов – подземные, подводные, приземные и воздушные, независимо от их природы. В статье «Взрыв» рассматривались взрывы различной природы – химические, ядерные, тепловые, электрические, механические. Общее для всех взрывов свойство – достаточно быстрое (внезапное) превращение части энергии, содержащейся в источнике взрыва, в кинетическую энергию продуктов взрыва.

В случае сферической симметрии источника взрыва почти при всех типах взрыва возникает сферический «поршень», представляющий собой сильно сжатый и нагретый газ, стремящийся расширяться. В окружающей среде (воздухе) образуется сферическая ударная волна. Поскольку ускоряющийся вначале газовый поршень по мере увеличения размеров замедляет свое движение (прежде всего, за счет сферичности расширения), за ударной частью волны следует волна разрежения. Мгновенный профиль давления в такой волне изображен на рисунке 4.

Было получено (в первую очередь для военных целей) выражение для давления во фронте ударной взрывной волны как функции расстояния

от точки взрыва. Из общих соображений теории подобия в механике сплошных сред это давление должно быть функцией величины  $\frac{q}{r^3}$ , где  $q$  – энергия взрыва,  $r$  – расстояние от точки взрыва. Для химических взрывчатых веществ, например,

$$\Delta p_{\phi} = 0,7 \frac{q}{r^3} + 0,27 \left( \frac{q}{r^3} \right)^{2/3} + 0,084 \left( \frac{q}{r^3} \right)^{1/3},$$

где  $\Delta p_{\phi}$  – избыточное давление во фронте ударной волны, измеряемое в мегапаскалях,  $q$  измеряется в килограммах тротилового эквивалента,  $r$  – в метрах. Численные значения коэффициентов в этом выражении были впервые экспериментально получены в 40-х годах прошлого века М.А.Садовским, а теоретическое обоснование формулы было выполнено в то же время Л.И.Седовым в СССР и Э.Тейлором в Англии.

### Воздействие ударных волн

Основным фактором воздействия ударной волны на препятствие является давление во фронте волны. Однако не представляется возможным однозначно сопоставить давление с характером воздействия волны. Кроме давления существенным оказывается и время действия волны сжатия. Так, например, разрушение рам, стекол и крыш при взрыве 1 килограмма тротила может происходить на расстоянии 10 метров от взрыва. При таком же отношении  $q/r^3$  для ядерного взрыва, у которого  $q$  в  $10^9$  раз больше («мегатонная» водородная бомба), на расстоянии 1 километр действие ударной волны будет гораздо сильнее (вплоть до полного разрушения зданий), а стекла вылетят при этом на расстоянии вплоть до 20 километров. А если еще будет дуть сильный ветер, то по направлению этого ветра разрушение окон может произойти и в 50 километрах от взрыва.

Очень сложно и неоднозначно воздействие ударных волн на живой организм. При сильной контузии (близкой к летальному исходу) поражающим фактором оказывается удар по грудной клетке, в результате которого в легких происходит закупорка воздушных путей. Для килограмма тротила это возможно на расстоянии около 3 метров. При мегатонном взрыве ударная волна поражает на расстоянии до 24 километров. Легкой контузией считается поражающий удар по барабанным перепонкам. Для килограмма тротила это происходит на расстоянии около 5 метров, а для «мегатонника» – до 20 километров (без ветра).

Но при взрывах разрушающее и поражающее действие чаще всего оказывает не воздушная взрывная волна, а местное (близкое к взрыву), так называемое бризантное действие и метательное действие взрыва.



Рис.4. Мгновенный профиль сферической взрывной волны ( $p_0$  – атмосферное давление)



Так, для разрушения большого строения иногда достаточно небольшого заряда, заложенного непосредственно внутрь (или рядом) с опорной конструкцией. А поражение людей производится либо оболочкой взрывного устройства (граната «лимонка»), либо специально заложенными в устройство мелкими металлическими предметами.

При ядерных взрывах к действию ударной волны добавляются и такие поражающие факторы, как тепловой (излучение огненного шара) и радиационный.

Ударные волны возникают не только в воздухе. При очень больших давлениях способность твердого тела сохранять свою форму теряется, и вещество «течет» подобно газу. Но, конечно, другое соотношение между давлением и плотностью приводит к другому уравнению ударного сжатия, нежели адиабата Гюгонио для газа.

Наибольшее давление, которое может создать химический взрыв в контакте с твердым телом, порядка  $3 \cdot 10^8$  Па (или 300000 атм). Если окружить твердый шар взрывчатым веществом, при его взрыве в твердом теле возникнет сферическая сходящаяся ударная волна, которая, отразившись «сама от себя», даст рекордное давление в веществе – до  $10^{12}$  Па (или 10 млн атм). При этом, правда, возрастает и температура, что затрудняет научное исследование вещества при таких сверхвысоких параметрах.

Сжатие твердого тела сходящейся волной используется в конструкциях ядерных бомб, которые могут найти (и находят) применение в мирных целях, а не в целях уничтожения культуры.

### Детонация и ее возникновение

Детонация – это особое волновое (точнее, импульсное) явление, когда химическая реакция распространяется по веществу со сверхзвуковой скоростью. Например, скорость детонационной волны в тротиле составляет 7 км/с, а в не менее печально известном в наше время гексогене – около 9 км/с. Есть взрывчатые вещества со скоростью детонации 13 км/с. А скорость звука в веществах такого типа (точнее, скорость распространения продольных упругих колебаний) – порядка 3 км/с.

Как объяснить такие большие скорости распространения химических реакций? В газовых смесях возникает быстрое горение. При этом перенос температуры от горючей смеси к еще не воспламенившейся происходит за счет теплопроводности и за счет диффузии активных центров реакции – свободных радикалов. Скорости переноса частиц и температуры много меньше скорости звука, поэтому скорость горения в газах порядка 20 м/с, а скорость горения твердых смесей (порохов) порядка 100 м/с.

Большая скорость детонации объясняется другими причинами. Детонация – явление не только химическое, но в большой степени и газодинамическое. Она объясняется распространением ударных волн. В ударной волне, где повышаются давление и температура, резко возрастает скорость химической реакции. Выделяющаяся при этом энергия (скорость движения час-

тиц) играет роль поршня, сжимающего еще не прореагировавшее вещество ударным (а не обычным адиабатическим) способом. Таким образом детонационная волна сама себя поддерживает.

Интересны процессы возникновения детонации в конденсированных средах. У многих взрывчатых веществ она начинается только при определенных и достаточно сильных воздействиях. Тротиловые шашки (кирпичики, похожие на мыло) можно поджечь, и они будут гореть, чадая, как плохие дрова (партизаны частенько использовали их для растопки в сырую погоду). Для того чтобы тротил сдетонировал, нужно применить ударное воздействие – произвести взрыв сначала в капсуле-детонаторе. Ударная волна этого «провокатора» в свою очередь заставит сдетонировать тротиловую шашку. А в капсуле-детонаторе содержится другое, гораздо более чувствительное взрывчатое вещество, которое может сдетонировать при небольшом ударе (гемучая ртуть). Сейчас чаще применяют электродетонаторы, в которых находится специальное вещество – азид свинца, легко детонирующее от нагрева (от проволоочки, по которой пропускается ток).

Очень многое в детонационных процессах еще остается загадочным и ждет своих исследователей.

### Взрыв-спаситель

Ударные волны и детонационные процессы играют важную роль и при ядерных взрывах. Эти взрывные явления станут темой следующей статьи из «взрывной» серии. Я уверен, что когда-нибудь настанет пора глобализации большинства земных государств и навсегда исчезнет опасность ядерной войны, а ядерные взрывы вновь с успехом будут применяться в самых разнообразных мирных целях.

Может быть, именно ядерные взрывы спасут человечество от глобальной катастрофы – столкновения нашей планеты с астероидом или кометой. Специалисты Центра космических полетов имени Маршалла, входящего в состав NASA, уже разработали модель аппарата, предназначенного для этой цели. Корабль-перехватчик будет иметь до шести ядерных боеголовок, которые, поочередно взрываясь на поверхности астероида, придадут импульсы, переводящие его на другую траекторию, безопасную для Земли.

Одной из первых целей кораблей-перехватчиков может стать астероид Апофис, который по предварительным расчетам в 2029 году пролетит мимо Земли на расстоянии около 37000 км, что примерно соответствует высоте геостационарной орбиты. При последующем «визите» он сможет под действием земного тяготения и упасть на Землю. Диаметр этого астероида около 400 км, масса порядка  $2 \cdot 10^{20}$  кг. Это больше, чем весь австралийский материк. Масштабы катастрофы невозможно даже представить – вряд ли после этого сможет сохраниться жизнь на Земле.

Так что взрыв-воитель, который бывает и взрывом-работником, может стать и взрывом-спасителем.

*(Продолжение следует)*