

§ 1. ЧТО ТАКОЕ ВЗРЫВ?

Взрывные процессы встречаются в природе так часто, и используются в различных областях техники настолько широко, что, вероятно, сейчас нет никого, кто не имел бы представления о взрывах. Но для понимания столь сложных явлений, как взрывы в звездах, общих представлений о взрывах недостаточно. Во-первых, явления, называемые взрывами, бывают вызваны различными причинами. Так взрыв парового котла происходит, когда давление пара в котле вследствие перегрева превышает допустимое, а снаряд взрывается в результате химической реакции сгорания взрывчатого вещества. Во-вторых, взрывы различны и по своим внешним особенностям. То, что мы видим при электрическом разряде, не похоже на явления, наблюдаемые при землетрясении. Прежде чем заниматься изучением космических взрывов, нужно выяснить, что же все-таки оказывается самым существенным в явлении взрыва, какие процессы следует относить к взрывным?

Обычно взрывом называют такое изменение физического состояния тела, которое сопровождается очень быстрым превращением энергии и выделением ее в окружающую среду. Это определение позволяет объединить в понятие взрыва, казалось бы, столь несходные процессы, как ядерный взрыв и вспышка молнии, удар метеорита о Землю и взрыв баллона с газом и другие.

Непременным условием всякого взрыва должна быть быстрота перехода одной формы энергии в другую. Если процесс перехода растянут во времени, то характерные черты взрыва не возникают. Например, в ядерном реакторе непрерывно освобождается энергия за счет медленно протекающих ядерных реакций, но это не является взрывом. Если же реакция сильно ускоряется и количество

энергии, которое должно выделиться за часы, освобождается за несколько секунд, то может произойти взрыв.

В этом параграфе мы займемся изучением общих свойств взрывов, случающихся в земных условиях. При взрыве происходит превращение химической, ядерной, электрической или механической энергии, в зависимости от природы взрыва, в тепловую энергию и излучение. В некоторых случаях существенная часть освободившейся при взрыве энергии уносится из области взрыва частицами — протонами, электронами и другими. Наконец, большая кинетическая энергия может быть приобретена отдельными частями взорвавшегося тела.

Значительная часть энергии, освобожденной в процессе взрыва, преобразуется в энергию движения окружающей среды; это обычно и воспринимается как самая характерная черта взрывного процесса. При взрыве бомбы, например, происходит сильное расширение воздуха из области взрыва. Движение среды возникает главным образом за счет тепловой энергии, либо непосредственно выделившейся при взрыве, либо образованной из других видов освобожденной энергии. Поэтому для понимания сущности взрывных явлений полезно вспомнить основные понятия, относящиеся к тепловой энергии.

Что же имеется в виду, когда говорят об освобождении тепловой энергии? О выделении тепла судят по тому факту, что тела, твердые, жидкие или газообразные, прилегающие к точке взрыва, нагреваются, т. е. их температура увеличивается. Всякое тело состоит из отдельных частиц — атомов или молекул. Под температурой тела понимается мера средней энергии движения составляющих его частиц. Чем больше температура, тем быстрее движутся частицы. Следовательно, при взрыве возрастает кинетическая энергия частиц, находящихся в области взрыва. Так, например, при взрыве пороха в патроне в результате очень быстро протекающей химической реакции горения образуется нагретый газ. Химическая энергия, содержащаяся в порохе, перешла в кинетическую энергию частиц газа.

Частицы нагретого газа при столкновениях друг с другом обмениваются энергией, но суммарная энергия всех частиц газа, находящихся в данном объеме, при этом не меняется. Кинетическая энергия каждой частицы равна половине произведения массы частицы на квадрат ее скорости v . Если сложить энергии всех частиц газа и сумму

разделить на их число, то получим величину средней энергии частицы $\frac{1}{2} m \overline{v^2}$. Здесь $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости, а величину $\sqrt{\overline{v^2}}$ называют средней квадратичной скоростью*). В газе всегда имеется некоторая доля частиц со скоростями, значительно превышающими среднюю квадратичную скорость, а также частицы со скоростями, меньшими $\sqrt{\overline{v^2}}$.

Температуру тел принято определять в так называемой абсолютной шкале (в градусах Кельвина, обозначаемых °K). В этой шкале начало отсчета соответствует нулевой энергии частиц. Эксперименты показали, что скорости частиц газа должны уменьшаться до нуля, с приближением его температуры к значению — 273°,16 по применяемой в обыденной жизни шкале Цельсия (°C). Поэтому начало отсчета абсолютной температуры — нуль градусов Кельвина — совпадает с указанным значением в °C.

Абсолютная температура T и средняя кинетическая энергия частиц связаны соотношением

$$\frac{m \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1)$$

где $\frac{3}{2} k$ — коэффициент пропорциональности. Он оказывается отличным от единицы, потому что масштаб шкалы температур выбирался из соображений практического удобства. Величина k , называемая постоянной Больцмана, в системе единиц CGSE имеет значение $1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град.

По формуле (1) можно вычислить среднюю скорость движения частиц газа в зависимости от температуры. Так, например, при температуре 15° C, соответствующей 288° K, средняя квадратичная скорость молекулы азота, имеющей массу $46,5 \cdot 10^{-24}$ г**), равна 467 м/сек.

*) Средняя квадратичная скорость не совпадает, вообще говоря, со средней скоростью. Это можно видеть хотя бы на примере системы из двух частиц, имеющих скорости v_1 и v_2 . Для нее $\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2}{2}$, а квадрат средней скорости равен $(\overline{v})^2 = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2}{4}$. Обычно $\overline{v^2}$ и $(\overline{v})^2$ для газа разнятся не очень сильно.

**) Массу молекулы можно найти, разделив массу грамм-молекулы на число молекул в ней (число Авогадро, равное $6,0 \cdot 10^{23}$).

Частицы нагретого газа движутся во все стороны; он стремится занять больший объем, т. е. расширяться. Если при движении в некотором направлении частицы встречают препятствие (для простоты примем, что это твердая стенка), то они, ударяясь в стенку, стремятся ее сдвинуть. Для того чтобы удержать преграду, требуется приложить силу. Величина этой силы, отнесенная к единице площади стенки, представляет давление газа.

Наиболее заметные последствия взрывов, в частности, их разрушающие действия, обусловлены именно давлением нагретого газа. Поэтому стоит уделить внимание вопросу о том, как частицами создается давление и как его величина связана с температурой и плотностью газа. Формула, которую мы сейчас получим, будет полезной нам в дальнейшем, при изучении космических явлений.

Если частица массы m движется со скоростью v , то говорят, что она обладает количеством движения mv . Количество движения в системе тел есть величина сохраняющаяся — оно без участия внешних сил не может ни исчезнуть, ни возникнуть, — таков один из основных законов физики. Пусть за 1 сек в 1 см^2 стенки ударяет N частиц, движущихся перпендикулярно к ней со скоростью v . В том случае, когда частицы прилипают к стенке, они передают ей ежесекундно количество движения, равное Nmv . В случае же, когда частицы отражаются от стенки как мячики, они изменяют направление скорости на противоположное. Полное изменение скорости частицы равно тогда $v - (-v) = 2v$, поэтому количество движения, передаваемое ими 1 см^2 стенки, составляет $2Nmv$.

Согласно хорошо известному из физики закону Ньютона, изменение количества движения за единицу времени равно действующей силе. В данном случае такой силой является сила, удерживающая стенку, поскольку именно благодаря ей стенка остается на месте, а частицы отражаются. Эта сила, как мы уже говорили, и представляет давление газа, которое, следовательно, равно $2Nmv$.

Допустим, что газ заключен в куб и частицы газа могут двигаться лишь перпендикулярно к граням куба, причем все они имеют одно и то же значение скорости. Тогда в сторону каждой из граней будет направляться одна шестая доля всех частиц. За одну секунду до преграды долетят лишь те из частиц, которые находятся от нее на расстоянии, не большем чем v . Более далекие частицы

за это время долететь до грани не успеют. Следовательно, за секунду на один квадратный сантиметр каждой грани попадает одна шестая часть от общего числа частиц, заключенных в столбике с основанием 1 см^2 и высотой v . Если число частиц в 1 см^3 газа n , то, поскольку объем этого столбика численно равен v , он содержит всего nv частиц, из которых ударяет в данную грань $N = \frac{1}{6} nv$ частиц. Поэтому для величины давления на грань получается выражение $\frac{1}{3} nmv^2$.

Сделанные нами предположения о характере движения частиц, конечно, не осуществляются в действительности. На самом деле частицы газа движутся с различными скоростями и под всевозможными углами к преграде. Но, тем не менее, оказывается, что и при точном вычислении давления получается такая же величина $\frac{1}{3} nmv^2$, причем под v надо понимать среднюю квадратичную скорость частиц газа. Так как согласно формуле (1) $m\bar{v}^2 = 3kT$, то величина давления, обозначаемая нами P , определяется соотношением

$$P = nkT. \quad (2)$$

Формула (2) является другой формой записи известного из школьного курса физики закона Клапейрона. Действительно, число частиц n в 1 см^3 равно числу частиц в грамм-молекуле A (числу Авогадро), деленному на занимаемый ею объем V . Подставляя в формулу (2) вместо n отношение $\frac{A}{V}$ и учитывая, что произведение $Ak = 6 \cdot 10^{23} \cdot 1,38 \cdot 10^{-16} = 8,3 \cdot 10^7 \text{ эрг/град} \cdot \text{моль}$ и есть величина универсальной газовой постоянной R , получаем выражение закона Клапейрона: $PV = RT$.

Стенка, в которую ударяют частицы газа, считалась нами «идеально отражающей». Это означает, что частицы после отражения имеют ту же скорость (по величине, но не по направлению), что и до столкновения. Если же величина скорости в результате столкновения меняется, т. е. стенка не является идеальным отражателем, то при ударе меняется и кинетическая энергия частицы. Пусть скорость частицы, летящей к стенке, равна v_1 , а после столкновения она имеет скорость v_2 . В случае, когда v_2 меньше v_1 ,

частица потеряла энергию, равную разности $\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}$.

Потерянная энергия распределилась между атомами, составляющими стенку, и заставила их двигаться быстрее (атомы в твердом теле также находятся в движении, но оно имеет колебательный характер). Температура стенки увеличилась: газ, отдав часть своей энергии, нагрел преграду. Если же температура стенки выше, чем газа, то налетающие частицы газа снабжаются в момент столкновения дополнительной энергией, отбираемой у частиц стенки и, отразившись, имеют скорость большую, чем до удара. Таким образом, нагретое твердое тело, соприкасаясь с более холодным газом и отдавая газу часть своей энергии, нагревает его.

Вернемся теперь к изучению взрывов. После того как энергия, послужившая источником взрыва, — химическая, ядерная или другая — преобразуется в тепловую энергию, давление газа, образовавшегося при взрыве (или имевшегося ранее во взрывающемся теле), сильно возрастает. Сила давления, действуя на окружающие тела, заставляет их двигаться и, значит, совершает работу. Таким путем часть энергии взрыва переходит в механическую (кинетическую) энергию.

На этом принципе основано действие двигателя внутреннего сгорания, в цилиндрах которого происходит серия небольших взрывов. Давление газа, образовавшегося при взрыве горючей смеси, заставляет двигаться поршень и через его посредство, например, автомобиль. Энергия взрывов при этом частично расходуется на нагрев цилиндра и поршня.

В тех случаях, когда взрыв происходит внутри твердого тела и давление оказывается настолько большим, что силы сцепления между частями тела не могут ему противостоять, происходит разрыв тела. Оторвавшиеся при этом части обладают кинетической энергией. Так происходит взрыв снаряда, который на своем конечном этапе сводится к преобразованию тепловой энергии в механическую.

Процессы перехода тепловой энергии в энергию движения жидкости или газа значительно сложнее описанного. В этих случаях движение осуществляется в форме взрывной волны — хорошо известного всем явления. Действием взрывной волны, например, выбиваются стекла в доме, находящемся довольно далеко от места сильного взрыва.

Взрывную волну иначе называют ударной волной. Сейчас мы схематически рассмотрим образование ударной волны, причем ограничимся лишь ударными волнами в газе — с жидкостями при изучении космических взрывов не приходится иметь дела.

Ударная волна представляет собой особую форму движения газа. В повседневной жизни мы все время встречаемся с различными видами движения воздуха. В частности, колебательное движение воздуха происходит при распространении звука. Источник звука периодически вызывает сжатие прилегающего к нему слоя воздуха. В этом слое давление возрастает и воздух в нем стремится расшириться, в свою очередь сжимая следующий, примыкающий к нему слой. Последовательность быстро чередующихся сжатий и разрежений воздуха и представляет собой звуковую волну. В обычных условиях скорость распространения этой волны в воздухе около 330 м/сек.

Изменения плотности воздуха при сжатиях и разрежениях в звуковой волне очень малы. Поэтому говорят, что звуковые колебания представляют собой слабые возмущения состояния воздуха. Скорость распространения таких возмущений определяется движением молекул. Ведь расширение сжатого слоя газа происходит в результате разлета составляющих его частиц и следующий слой сожмется лишь тогда, когда «почувствует» действие частиц расширяющегося слоя. Поэтому-то найденное нами выше значение средней квадратичной скорости молекул азота по порядку величины соответствует экспериментальному значению скорости звука*). Следовательно, чем выше температура газа, тем быстрее в нем распространяются звуковые колебания.

Взрыв обычно сопровождается сильным возмущением состояния газа, которое и называется ударной волной. Возникновение ударной волны связано с быстрым и сильным сжатием газа. Этот процесс удобно рассматривать, представив себе, что в очень длинную трубу, наполненную газом, ускоренно вдвигается поршень. Предположим, что скорость поршня увеличивается скачками (рис. 1) — ведь ускоренное движение всегда можно приближенно

*) Совпадение оказывается не вполне точным, потому что сжатие воздуха производится не только молекулами, летящими в направлении распространения звука, но и движущимися под углом к нему, так что скорость их в данном направлении меньше.

представить как результат большого числа скачкообразных изменений скорости.

В первую очередь сожмется газ вблизи поршня. Так как вначале скорость поршня мала, то возмущение газа слабое и распространяется со скоростью звука. Оно не может сразу охватить весь газ, заключенный в трубе. Поэтому в газе существует область, затронутая возмущением (волна сжатия), и невозмущенная область.

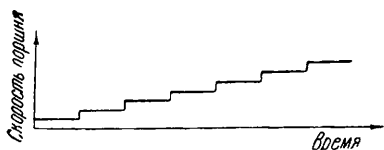


Рис. 1. Изменение скорости поршня со временем.

В результате сжатия газ нагревается. (Это явление, хорошо известное всякому, заметно хотя бы при накачивании велосипедной камеры.) Дело в том, что работа, производимая при

вдвигании поршня в трубу, лишь частично расходуется на сообщение газу кинетической энергии. Частицы газа сталкиваются с движущимся поршнем и после отражения от него обладают большей кинетической энергией, чем до столкновения. Поршень отдает частицам свою кинетическую энергию, причем полученная ими энергия распределяется среди других частиц. В результате средняя энергия частиц, т. е. температура газа, увеличивается. Так как частицы газа обладают преимущественной скоростью в направлении движения поршня (ведь они получают от него некоторое количество движения), то весь газ в волне сжатия движется как целое в том же направлении, что и поршень.

При следующем скачкообразном увеличении скорости поршня по газу снова распространится возмущение. Поскольку газ нагрет предыдущим сжатием, оно пройдет быстрее первоначального и поэтому нагонит границу волны сжатия. Но перегнать эту границу возмущение не может, потому что скорость всех звуковых волн в невозмущенном газе (впереди волны сжатия) одна и та же. Догнав границу, второе возмущение увеличит перепад давления и плотности на ней. Последующие возмущения, возникающие при дальнейшем ускорении поршня, продолжают увеличивать резкость перехода от области сжатого газа к невозмущенному.

При обычных течениях газа температура и плотность в нем плавно меняются от точки к точке. В рассматриваемом же случае создается иное положение. Когда скорость

поршня станет достаточно большой, будет заметно, что состояние газа скачкообразно изменяется (рис. 2). Та поверхность, на которой происходит это изменение, называется фронтом ударной волны. Сила волны определяется перепадом давления на ее фронте. Чем больше давление за фронтом по сравнению с давлением в невозмущенном газе, тем сильнее волна.

Практически фронт ударной волны — это очень тонкий слой газа, внутри которого и меняются величины, характеризующие состояние газа — плотность, температура и давление. Фронт волны движется в ту же сторону, что и поршень (быстрее поршня), захватывая все новые области газа. При этом газ уплотняется и нагревается, получая одновременно некоторую скорость в направлении движения волны.

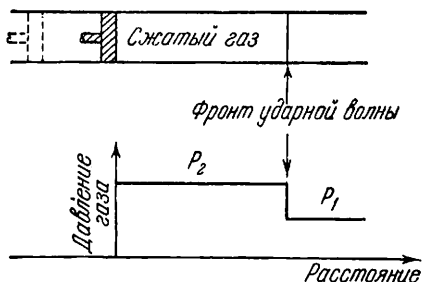


Рис. 2. Распределение давления в газе, по которому распространяется ударная волна. Пунктиром представлено начальное положение поршня.

В образовании ударных волн при взрывах роль поршня играет расширяющийся газ, давление в котором, как мы уже отмечали, возрастает в результате его нагрева. Если условия расширения во все стороны одинаковы, то фронт волны имеет форму сферы с центром в точке взрыва. После того как продукты взрыва расширились и охладились, давление в волне падает. Волна ослабляется, потому что ее энергия затрачивается на нагрев и приведение в движение все новых масс газа, а компенсации потерь энергии не происходит.

Количество вещества, захватываемое фронтом сферической ударной волны, возрастает при ее движении от точки взрыва. На расстоянии R от этой точки оно пропорционально R^2 , т. е. площади сферы. Поэтому сила сферической волны уменьшается с расстоянием гораздо быстрее, чем, например, сила образованной поршнем в трубе плоской волны.

В энергию ударной волны может переходить в конечном счете энергия, выделившаяся при взрыве в других

формах, а не только тепловая. Так, например, излучение, возникшее в процессе ядерного взрыва, за очень короткое время нагревает воздух вблизи точки взрыва. Давление там увеличивается и при расширении нагретого воздуха создается ударная волна, распространяющаяся на большое расстояние.

Действие сильной ударной волны сказывается, во-первых, в том, что ею приводятся в движение большие массы вещества и, во-вторых, в нагревании газа, вызывающем его свечение. Оба эти обстоятельства оказываются очень важными для исследования космических взрывов, так как по движению и свечению небесных тел можно судить о силе космических взрывов и других их особенностях.

В заключение этого параграфа, до того как перейти к изучению космических взрывов, скажем о количественных характеристиках взрывов. Прежде всего, взрывы различаются по количеству освобожденной энергии. В качестве условной единицы принимается энергия, выделяемая при взрыве одного килограмма сильного взрывчатого вещества — тринитротолуола (ТНТ). Она равна 10^6 калорий. Одна калория эквивалентна $4,18 \cdot 10^7$ эргов (единиц энергии в системе CGSE) или 4,18 джоуля (единиц энергии в системе СИ)*). Значит, взрыв одного килограмма ТНТ приводит к освобождению энергии в количестве $4,2 \cdot 10^{13}$ эрг или $4,2 \cdot 10^6$ дж. По выделению энергии мегатонная термоядерная бомба соответствует миллиону тонн или 10^9 кг ТНТ. Следовательно, взрыв такой бомбы дает $4,2 \cdot 10^{22}$ эрг энергии.

Действие взрыва на окружающую среду зависит не только от общего количества освобожденной энергии, но и от того, насколько быстро она выделяется. При делении энергии взрыва на время, за которое выделилась энергия, получаем величину, называемую мощностью взрыва. Если, например, взрыв мегатонной бомбы занимает $1/1000000$ секунды, то ее мощность составляет $\frac{4,2 \cdot 10^{22}}{10^{-6}} = 4,2 \cdot 10^{28}$ эрг/сек или $4,2 \cdot 10^{21}$ дж/сек. Единица мощности, соответствующая одному джоулю за секунду, назы-

*) В дальнейшем мы будем пользоваться системой CGSE, а читатель при желании сможет перевести ту или иную величину в систему единиц СИ, пользуясь указанным соотношением.

вается ватт, а в тысячу раз большая величина — киловатт. Таким образом, мощность мегатонной бомбы составляет $4,2 \cdot 10^{18}$ киловатт, тогда как мощность самых крупных гидроэлектростанций не превосходит нескольких миллионов киловатт. Для выработки энергии, равной освободившейся при взрыве мегатонной бомбы, требуется более десяти суток работы электростанции мощностью 4 миллиона киловатт. Величина мощности особенно существенна для земных взрывов, так как именно ею определяется разрушающее действие взрыва.

§ 2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ

Выяснение природы земных взрывов обычно не вызывает затруднений. Не только при созданных искусственно, но и при естественных взрывах бывает известно, преобразование какой энергии вызвало взрыв. Основное внимание обращается на изучение эффектов, сопровождающих взрывы, таких, как ударные волны, звуковые волны, свечение. Эти явления регистрируются непосредственно при помощи различных приборов.

При исследовании же космических взрывов зачастую трудно сказать с уверенностью, каков источник энергии взрыва. Этот вопрос может быть решен только после тщательного изучения всех доступных наблюдению явлений, вызванных взрывом.

Трудности в исследовании космических взрывов, как и других астрономических явлений, обусловлены главным образом чрезвычайной удаленностью космических объектов от наблюдателей. Расстояние даже до ближайшего к Земле небесного тела, Луны, более чем в девять раз превосходит длину земного экватора. Солнце же находится в 400 раз дальше от Земли, чем Луна, — на расстоянии 150 миллионов километров. И даже эта величина оказывается очень малой по сравнению с расстоянием, отделяющим нас от соседних звезд.

Для действия любого прибора, используемого при изучении взрыва, нужно, чтобы до прибора дошла некоторая часть энергии, освободившейся при взрыве. Получаемая земными наблюдателями доля энергии взрыва, происшедшего на отдаленном небесном теле, ничтожно мала, потому,