

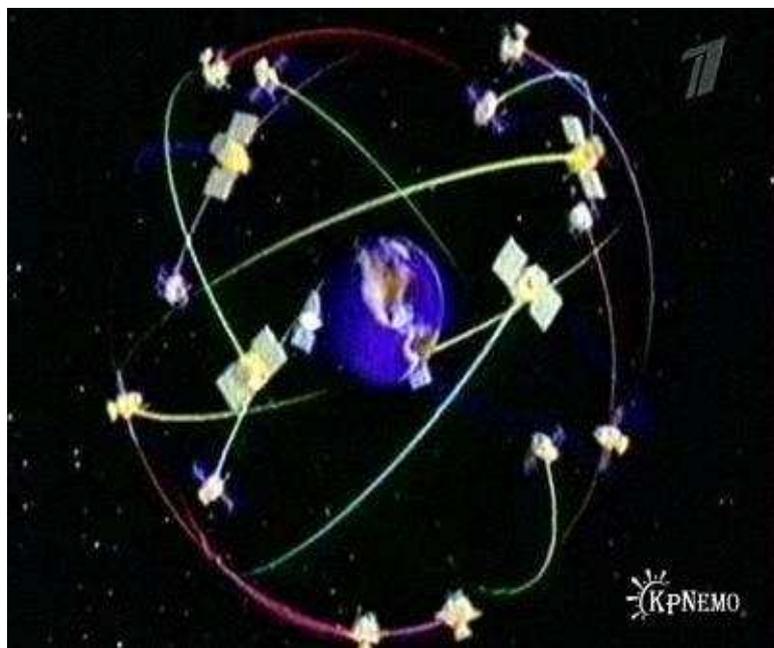
**И. Е. Хорев**



**УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ  
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ТЕХНОСФЕРЕ: УЧЕБНОЕ  
ПОСОБИЕ**

Учебное издание  
И. Е. Хорев

Ударные волны и безопасность жизнедеятельности в техносфере: учебное пособие



Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 8, 92  
Тираж 100 экз. Заказ  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел. (8 382)52-79-12

Министерство образования и науки Российской Федерации

*ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)*

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА (РЭТЭМ)  
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
**«Физика горения и взрыва»**

ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ:

***020801 (013100) «Экология» и 280101 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере»***

Разработчик:

профессор кафедры РЭТЭМ, д.т.н. И.Е. Хорев

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012

Ударные волны и безопасность жизнедеятельности в техносфере

Содержание	стр.
Введение.	6
1. Ударные волны естественного происхождения на Земле.	11
1.1. Гром и молния	15
1.2. Землетрясение	
1.3. Извержение вулканов	20
1.4. Падение метеоритов	22
1.5. Взрывающиеся звёзды и галактики	25
1.6. Космологический «большой взрыв»	
2. Ударные волны, искусственно создаваемые на Земле.	29
2.1. Щелчок кнута	30
2.2. Порох	32
3. Ударные волны в космосе.	35
3.1. Солнечный ветер	36
3.2. Солнечные вспышки	39
4. Параметры (характеристики) ударных волн	42
4.1. Ударные волны в сплошных средах	43
4.2. Параметры ударных волн	45
4.3. Ударная адиабата конденсированного вещества	46
4.3. Экспериментальные методы отыскания ударных адиабат	49
4.4. Расчёт начальных параметров ударной волны	56
5. Ударные волны и существование человека в техносфере	57
5.1. Ударные волны и сохранение жизни на Земле	57
5.2. Ударные волны и человек	59
Литература	60
Приложения	61

Учебно – методическое пособие посвящено сложнейшей в научном отношении теме – физике и механике ударных волн. Оно даёт представление о многих типах ударных волн и их роли в науке, технике, природе и космосе, что в свою очередь даёт представление о безопасности жизнедеятельности в техносфере в целом, включая разработку эффективных защитных устройств транспортных средств наземного, морского, воздушного и космического базирования от взрывных и ударных нагрузок.

Настоящее пособие даёт направленное представление о естественных (космического и земного происхождения) и искусственных (вызванных человеком) взрывах и ударно – волновых явлениях. Хотя ударные волны естественного происхождения на Земле (землетрясение, извержение вулканов, грозы, падение метеоритов и т.д.) всегда вызывали удивление, ужас, страх и трепет, а последствия их часто бывали трагическими для отдельных людей, они никогда не угрожали существованию человечества на нашей планете. Только с изобретением современного ядерного оружия с тротильным эквивалентом в сотни и тысячи мегатонн всё живое на нашей планете (включая его создателя – человека) оказалось под беспрецедентной угрозой гибели от разрушительных взрывов и вызываемых ими: светового излучения, радиации и мощнейших ударных волн.

В то же время имеется много примеров мирного и созидательного применения взрывов и ударных волн, в том числе грандиозные перспективы использования ядерных взрывов на благо всего человечества. Их применение, несомненно, откроет новые энергетические ресурсы, столь необходимые человечеству для восполнения запасов истощающегося природного сырья и создания новых высокоэкономичных технологических процессов (сварка взрывом, да же материалов, которые нельзя сварить обычной электросваркой, например, металл - пластик, создание новых высокопрочных покрытий, получение новых материалов и изделий, включая ювелирные алмазы) и даже лечение людей - «разрушение камней в почках» ударными волнами слабой интенсивности.

Кроме того, разгадка механизма космических взрывов и ударных волн в космосе даст, возможно, ключ к пониманию возникновения Вселенной, нашей Солнечной системы, Земли, планет и даже самой жизни.

В данном обзоре рассматриваются ударные волны, возникающие при мгновенном высвобождении (взрыве) химической, ядерной, электрической, лучистой или механической энергии в ограниченном пространстве.

## ВВЕДЕНИЕ

### Что такое ударные волны? Где и как они возникают? Какую роль они играют в техносфере?

Сколько раз вы просыпались от удара грома? Сколько раз вы невольно вздрагивали от ослепительных вспышек света, сопровождаемых оглушительным каскадом громовых раскатов? По самым приблизительным подсчетам только этот тип ударно-волновых явлений ежегодно уносит сотни человеческих жизней и производит разрушения, ущерб от которых исчисляется сотнями миллионов долларов. Но все это ничто по сравнению с уроном, наносимым крупными землетрясениями и извержениями вулканов, которые относятся к другому типу явления, порождающих ударные волны на Земле. Следует отметить, что в приведенных выше примерах образования ударных волн в природе трагические последствия обусловлены вторичными явлениями. Во время грозы молнии могут вызвать опустошительные пожары. Во время землетрясения колебания земной поверхности приводят к разрушениям и хаосу. Во время извержения вулкана наибольшие разрушения могут произвести потоки раскаленной лавы и летящие куски породы, сжигающие и погребаяющие поселения далеко от очага извержения.

В отличие от описанного выше ударные волны, возникающие в результате химического или ядерного взрыва, создают такие разрушительные давления, ураганные ветры, всепожирающие пожары и смертельную радиацию, что появляется угроза уничтожения на огромных площадях всего живого и всего созданного человеком. Конечно, падение метеорита может привести к аналогичным последствиям. Мы не располагаем убедительным количеством документальных данных на этот счет, но и одного только примера Унгавского кратера в провинции Квебек в Канаде (диаметром ~3,5 км и глубиной 0,435 км) достаточно, чтобы понять, что, если такой метеорит когда-нибудь упадет на крупный город, последствия будут не менее ужасны, чем последствия взрыва термоядерной бомбы мощностью во много мегатонн.

После этого краткого обзора ударно-волновых явлений, возникающих в природе, было бы уместно пояснить, что мы понимаем под ударной волной. Наглядно ее можно представить как очень крутой и тонкий волновой фронт. (Следует отметить, что на уровне моря ударная волна в воздухе имеет толщину — 0,025 мкм. тогда как длина световой волны в инфракрасной области составляет ~1 мкм). Ударная волна возникает, когда в веществе (газообразном, жидком или твердом) внезапно высвобождается или вводится в него извне энергия, вызывая взрыв или удар. При сферическом взрыве процесс протекает следующим образом. Когда химическая или ядерная энергия внезапно (за милли- или микросекунды) высвобождается в воздухе, воде или под землей, образуется сферический объем раскаленного газа, находящегося под высоким давлением, который, расширяясь, вызывает ударную волну в окружающей среде. Ударная волна движется подобно приливной волне и мгновенно повышает давление, плотность и температуру среды. Она также создает поток вещества, который следует за ней. По мере того как сферическая ударная волна охватывает все большие объемы вещества, она постепенно затухает, превращаясь в слабое возмущение или

звуковую волну (от грохота до шороха). Затухание происходит очень быстро вблизи источника взрыва, когда ударная волна очень сильна или когда давление, температура, плотность и скорость за ней очень велики, и почти прекращается, когда волна превращается в звуковой импульс. Расстояние, на котором ударная волна ослабляется до звуковой, в газе намного больше, чем в жидкости, а в жидкости намного больше, чем в твердом теле. Например, при заданном начальном диаметре заряда это расстояние в воздухе составляет несколько сотен диаметров заряда, в воде — около двух диаметров и в твердом теле — меньше одного диаметра. Нагретая взрывом сфера расширяется и пульсирует до тех пор, пока не достигнет равновесного размера, соответствующего давлению окружающей среды. Затем нагретое вещество в воздухе диффундирует, в воде дробится на пузырьки газа, а под землей заполняет полые пространства.

Приведенное выше описание физической природы ударной волны не позволяет, однако, представить это явление наглядно. Пожалуй, одной из самых лучших иллюстраций может служить волна морского прибоя, изображенная на рис. 1. На фотографии мы видим спортсмена, ускользящего от набегающей стены воды, которую можно сравнить с резким скачком давления при переходе через сильную ударную волну в газе. Там, где находится спортсмен, давление меньше, чем в точке, расположенной на том же уровне за волной. Каждый столб воды высотой 10 м добавляет в такой точке давление в 1 атм. В этом смысле оба явления сходны. Ударная волна внутри воды или твердого тела напоминает ударную волну в газе. Хотя процессы молекулярных столкновений, приводящих к повышению давления, температуры, плотности



Рис. 1. Представление ударной волны с помощью огромной морской волны (буруна).

и скорости потока за движущейся ударной волной для газов, хорошо известны, для жидкостей и твердых тел нет таких четких представлений. Между ними имеется существенное различие. Вследствие большой инерции вещества гребень водяной волны разрушается. С ударными волнами этого не происходит.

Трудно выявить ударные волны в газе, жидкости или твердом теле, поскольку даже в прозрачной среде нельзя наблюдать за их очень быстрым движением без помощи специальных оптических методов и приборов. Огромная морская волна, готовая поглотить спортсмена, даст представление о скачке давления при переходе через ударную волну.

Во время грозы энергия быстро отводится по длинному зигзагообразному каналу посредством электрического разряда. Поскольку скорость света в воздухе в миллион раз больше скорости звука, мы видим отдаленную вспышку молнии задолго до того, как услышим раскаты грома. Во время землетрясения внезапное высвобождение накопленной механической энергии вследствие разрыва земной коры под действием сдвига приводит к возникновению волн нескольких типов, распространяющихся под землей и по поверхности земли. При извержении вулкана происходит мгновенное выделение энергии, когда раскаленные газы и жидкости, находившиеся под высоким давлением внутри Земли, внезапно выбрасывают в воздух значительную часть жерла вулкана. Установлено, например, что во время извержения вулкана Кракатау в 1883 г. в атмосферу было выброшено несколько кубических километров вулканического пепла и других продуктов извержения, что вызвало значительное загрязнение окружающей среды и в течение нескольких месяцев служило причиной великолепного многоцветья закатов и других явлений в верхних слоях атмосферы. Когда о землю ударяется метеорит, на поверхности мгновенно высвобождается огромное количество накопленной (за счет массы и скорости движения метеорита) кинетической энергии. При этом возникают ударные волны как на Земле, так и в воздухе. Аналогичным образом, когда при движении сверхзвукового аппарата происходит звуковой удар в атмосфере, необходимая для этого энергия поступает от двигателей, в которых сгорает топливо. Удар может также ощущаться в воде или на поверхности земли в виде опережающей волны возмущения, поскольку скорость звука в земной коре или в воде может превышать скорость полета (скорость звука в воде  $\sim 1500$  м/с, в земле  $\sim 900$  м/с, в воздухе 330 м/с).

Когда сильная ударная волна порядка нескольких атмосфер распространяется в невозмущенной среде (жидкой, твердой или газообразной), давление, температура и плотность возмущенного состояния увеличиваются во много раз. Поэтому люди и животные, попавшие в зону действия ударной волны, гибнут, а сооружения разрушаются под действием внезапного и сильного изменения давления. Кроме того, аэродинамическое сопротивление (ветер), создаваемое за счет скорости потока, может нанести большой ущерб людям, животным и сооружениям. Даже в случае слабых ударных волн силы давления обычно вызывают паническое состояние, несмотря на то что избыточное давление может составлять всего одну тысячную долю атмосферы ( $\sim 100$  Н/м<sup>2</sup>). Примерно такое же избыточное давление на поверхности земли возникает на некотором расстоянии от удара молнии или при полете современного сверхзвукового

самолета типа «Конкорд» со скоростью, в два раза превышающей скорость звука (2080 км/ч, т. е.  $M = 2$ ), на высоте 15 км. При движении самолета возникают головная и хвостовая ударные волны конической формы, пересечение которых с Землей напоминает по форме подкову шириной 80—160 км, проходящую над континентами и морями вдоль всего пути самолета. Возникающая N-волпа, которая получила свое название в связи с тем, что кривая зависимости вызываемого ею давления от расстояния или времени напоминает букву N, порождает неприятный звуковой удар. Его воздействие может быть настолько неприятным, что до сих пор обсуждается вопрос, допустимы ли вообще полеты сверхзвуковых самолетов над населенными районами, пока превышение давления не будет снижено до приемлемого уровня (менее  $5 \text{ Н/м}^2$ ). И отличие от грозового разряда, который представляет собой мгновенное явление, звуковой удар, производимый самолетом, явление постоянное, и каждый, над кем пролетает самолет, испытывает одинарный или двойной удар (в зависимости от того, короче или длиннее N-волна 30 м, поскольку человеческое ухо не способно различить два пика N-волны, если она слишком коротка).

С изобретением пращи, кнута, пороха, пушек, взрывчатых веществ (ВВ), бомб, ядерного и термоядерного оружия человек познавал, как высвобождать все большие количества энергии (вплоть до 100 Мт ТНТ) за все меньшие промежутки времени ( $10^{-7}$  с, или 0,1 мкс, или 0,1 миллионной доли секунды), производя таким образом ударные волны почти невообразимой силы. В настоящее время запасы атомного оружия таковы, что на душу населения (мужчину, женщину или ребенка) приходится по несколько сотен тонн ТНТ. Такие беспрецедентные возможности массового уничтожения могут превратить даже малую атомную войну во всемирную катастрофу.

Поскольку в течение долгого времени мы связывали взрывы с огромными разрушениями, страшными трагедиями и бесчисленными несчастьями, которые они приносят во время войны, мы часто забывали о том, что они широко используются в мирных-целнх. Вряд ли наше индустриальное общество смогло бы достигнуть современного уровня развития, если бы не использовались химические взрывчатые вещества, столь необходимые при строительстве дорог, туннелей, шахт, сооружений, при обработке металлов давлением и плакировании, а также для осуществления различных операций при выполнении космических программ, таких, как выключение, наддув, управление и синхронизация действий различных механизмов. Осуществление крупных проектов, таких, как строительство гаваней, плотин, каналов, добыча природного газа и нефти из непродуктивных месторождений, а также геотермального тепла Земли для комплексных тепловых электростанций,— это лишь часть возможных применений ядерных взрывов в будущем. Управляемые ядерные реакторы (в которых при безаварийной работе не происходит образования ударных волн) уже вырабатывают значительное количество электрической энергии во многих странах. Управляемые термоядерные реакторы, которые к 2000 г. станут реальностью, смогут обеспечить все энергетические потребности мира в предвидимом будущем.

В качестве источника мгновенно высвобождаемой энергии излучения заслуживает упоминания также лазер, сфокусированный луч которого может выделять малые

количества энергии (от нескольких джоулей до нескольких тысяч джоулей, или, в пересчете на тротильный эквивалент, от долей грамма до нескольких граммов) в исключительно короткие промежутки времени (от  $10^{-12}$  до  $10^{-9}$  с, т. е. от 1 пс до 1 нс). Для иллюстрации малости рассматриваемых значений времени заметим, что в секунду свет проходит 300 тыс. км, а в пикосекунду — только 0,3 мм. Поскольку мощность — это энергия, выраженная в джоулях (или в ватт-секундах), деленная на время разряда, ее величина в данном случае может достигать астрономических чисел порядка  $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>. Вследствие этого в лабораторных условиях можно создавать чрезвычайно сильные ударные волны и плазму (газ, обладающий высокой проводимостью и состоящий из электронов, ионов и нейтральных атомов), параметры которых и положение в пространстве легко регулируются. Весьма возможно, что лазерам суждено стать пусковыми устройствами управляемых термоядерных реакторов.

Даже нескольких приведенных примеров достаточно, чтобы показать, что во многих частях света люди время от времени подвергаются воздействию ударных волн различного типа, которые угрожают их благополучию и даже существованию. Аналогичные явления происходят и в космосе в поистине астрономических масштабах, что позволяет нам, наблюдая за ними, узнавать о возникновении и смерти звезд и галактик, изучать эволюцию Вселенной. Некоторые космологи считают, что эта эволюция началась с гигантского взрыва в точечном источнике (теория «большого взрыва») или даже что вся жизнь на Земле возникла в результате взрыва Сверхновой звезды, при котором высвободились вещества, необходимые для развития жизни.

Все это делает изучение явления ударных волн очень важным и интересным. Во многих случаях новая информация по этому вопросу может спасти человеческие жизни: разработка систем, заблаговременно предупреждающих о возникновении ураганов (это уже делается с помощью спутников) или грозящих землетрясениях и извержениях вулканов (это пока дело будущего), строительство сейсмостойких зданий; обнаружение подземных ядерных взрывов; защита от обвалов в шахтах; создание теплозащитных покрытий для космических кораблей, гарантирующих безопасный вход в плотные слои атмосферы, и для разрабатываемых гиперзвуковых космических аппаратов многоразового действия и транспортных средств космического базирования, защищенных от высокоскоростного удара техногенных осколков космического мусора в ближнем космосе.[ ]. К счастью, существует множество лабораторных установок, таких, как газодинамические электрические или химические ударные трубы, сверхскоростные баллистические трассы, химические взрывчатые вещества для наземных и подземных испытаний и сверхзвуковые аэродинамические трубы, с помощью которых ударные волны можно изучать очень подробно с небольшими материальными затратами, сравнивая данные эксперимента с теоретическими расчетами. Интересно отметить, что солнечный ветер (поток электронов и нуклонов, т. е. атомов, лишенных всех электронов) создает в космическом пространстве естественный ветер, который обтекает Землю со сверхзвуковой скоростью ( $M \approx 10$ ). Таким образом, сама Земля представляет «испытываемую» модель с отсоединенной головной ударной волной и хвостовой ударной волной шириной в тысячи километров. Этот поток известен под названием магнитосферы. С помощью спутников уже удалось

измерить структуру ударных волн, возникающих перед Землей в магнитосфере, и получить важные данные, которые помогут нам понять природу самых верхних слоев атмосферы. И наконец, ударные волны постоянно возникают на Солнце и являются частью сложных процессов, которые обеспечивают непрерывную работу солнечного ядерного реактора. Без Солнца жизнь на Земле была бы невозможна, и поэтому жизненно важная связь между ударными волнами и человеком абсолютно очевидна.

## 1. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ЗЕМЛЕ1

Некоторые типы ударно-волновых явлений естественного происхождения, встречающиеся на Земле, были кратко упомянуты во введении. Теперь они будут рассмотрены подробнее. Чтобы разобраться, что происходит во время вспышки молнии, рассмотрим вначале небольшой цилиндрический элемент электрического разряда. В грубом приближении такое явление возникает например, при взрыве сферического заряда ТНТ. Это проиллюстрировано на рис. 2, для трех последовательных моментов времени.

Образовавшийся при взрыве газ толкает взрывную волну с крутым фронтом, давление  $p$  в которой падает с увеличением расстояния  $r$ . При этом энергия сжатого слоя распределяется на всё больший объём, при этом давление естественно падает тем больше, чем больше объём сжатой области. Газ, образовавшийся при взрыве, расширяется до конечного колеблющегося объёма, в то время как объём воздуха, охватываемого и нагреваемого ударной волной, растёт с увеличением расстояния, и поэтому ударная волна расходует свою энергию и затухает. Скорость затухания ударной волны вблизи источника взрыва при сферических взрывах больше, чем при цилиндрических, а при цилиндрических больше, чем при плоских. Вдали от источника ударные волны всех типов превращаются в звуковые.

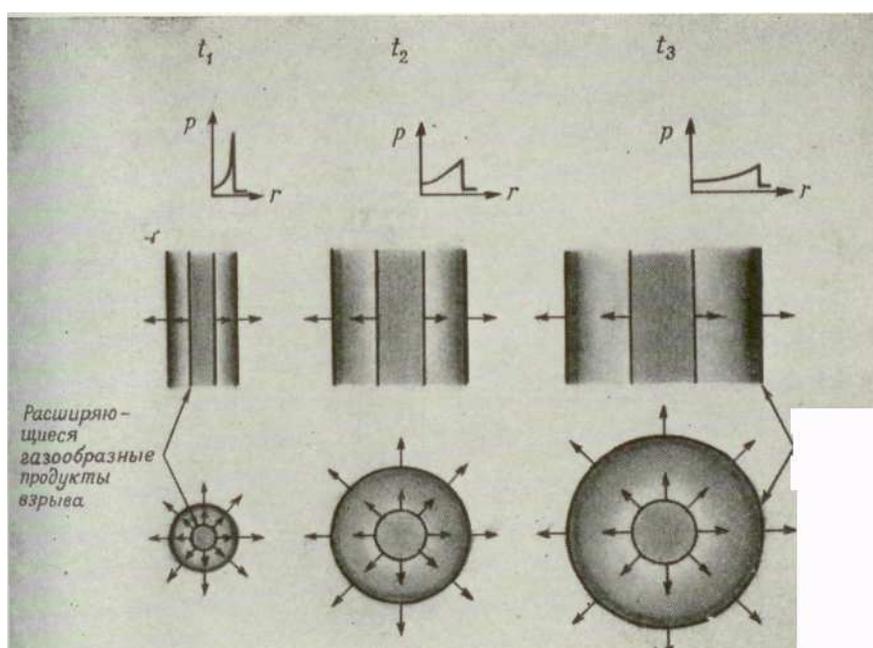


Рис. 2. Схематическое изображение цилиндрического и сферического взрывов.

Видно, что давление  $p$  изменяется в зависимости от расстояния  $r$  в интервале между ударной волной и границей контактной поверхности расширяющегося толкающего газа (нагретого электрически с помощью электрического разряда, химически вследствие взрыва или излучением с помощью лазерного луча) и давление за ударной волной уменьшается с увеличением расстояния от источника взрыва. Это уменьшение происходит не с постоянной скоростью: вначале скорость максимальна, а в конце минимальна (нелинейный процесс). Кривая давления внутри толкающего газа имеет более сложный вид и для простоты не показана. В действительности движение контактной поверхности той, является сложным: достигнув равновесного положения, она распадается вследствие конвекции и диффузии. Эту упрощенную модель ударных волн, возникающих во время грозы, можно экспериментально проверить, наблюдая за электрическим взрывом проволоочки, показанным на рис.3.

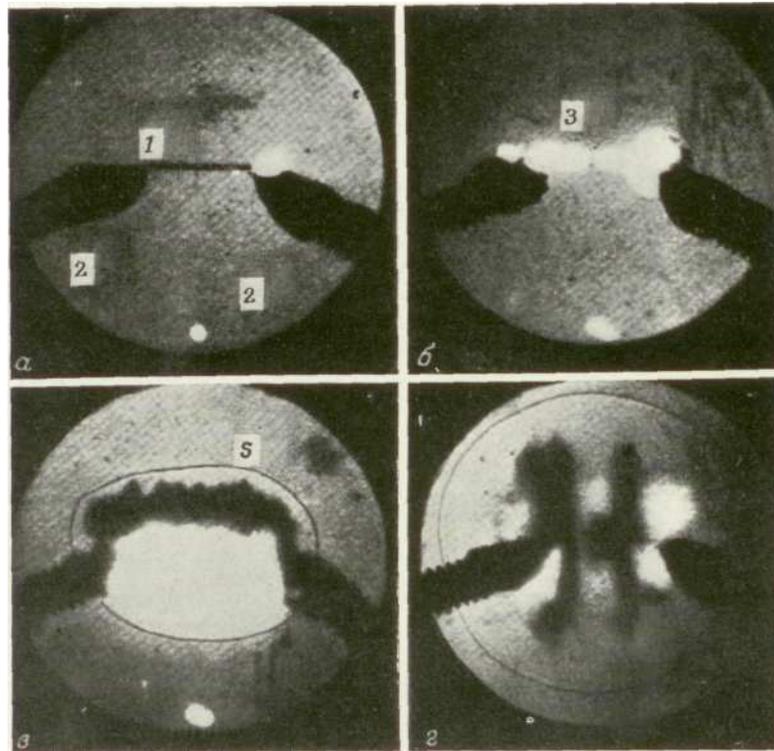


Рис.3. Фотографии взрывной (ударной) волны, образующейся при взрыве медной проволоочки.

Диаметр медной проволоочки 0,05 мм. Конденсатор, используемый для обеспечения энергии взрыва, заряжался до напряжения 2000 В. Время экспозиции для каждой фотографии составило 10 нс (0,01 мкс). а —  $t = 5,4$  мкс; б —  $t = 5,7$  мкс; в —  $t = 10,0$  мкс; г —  $t = 15$  мкс;  $t$  - время, отсчитываемое от начала разряда конденсатора; 1 — проволоочка; 2 — электрод; 3 — испарившееся вещество проволоочки; S — ударная волна.

Видно, как под действием тока высокого напряжения проволоочка испаряется с образованием светящегося ионизованного канала разряда. При расширении

ионизированных паров меди перед ними возникает взрывная или ударная волна, постепенно затухающая и превращающаяся в звуковую волну, напоминающую гром. В действительности это канал можно рассматривать как участок более длинного канала разряда молнии, возникающей во время грозы (подробнее см. рис. ).

Обычно мы не можем видеть ударную волну ни в газе, ни в жидкости, ни в твердом теле. Воздух, например, невидим для нас как при высоком, так и при низком давлении (плотности). Однако с увеличением плотности газа показатель преломления (оптический параметр) также увеличивается. Это позволяет увидеть ударные волны с помощью сравнительно простых методов: интерферометрии, шлирен-фотографии и теневого фотографирования. Интерферограмма показывает изменение плотности в ударной волне; шлирен-фотография – скорость изменения плотности, т. е. её градиент, а теневая фотография – скорость изменения самого градиента. Изображение ударной волны на теневой фотографии (рис.3) имеет вид чёрной полосы и следующей за ней белой. Ещё яснее это видно на рис.4.

На рис.4 представлена теневая фотография взрывающейся сферы, первоначально наполненной воздухом под давлением 2 Мпа (20 атм), полученная через 375 мкс после разрушения сферы механическим пробойником (экспозиция – несколько микросекунд).

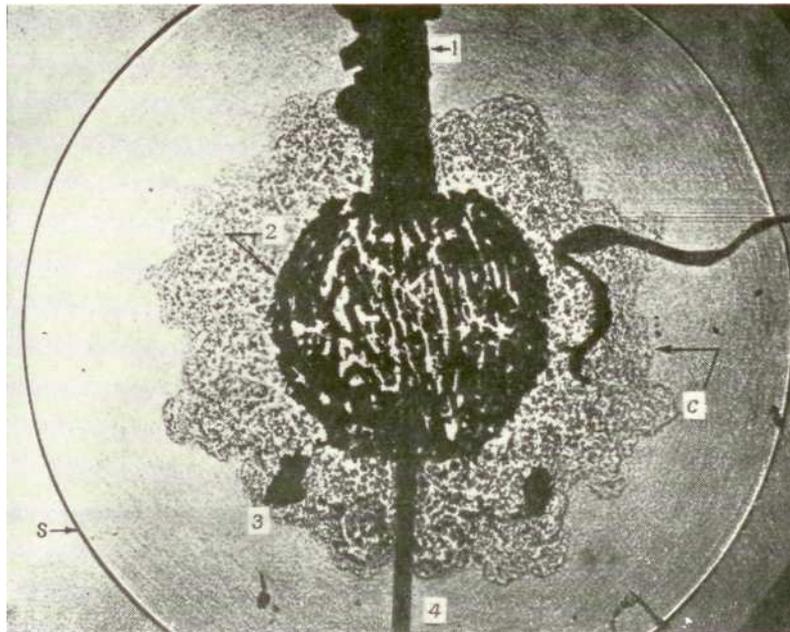


Рис. 4.Искровая теневая фотография взрыва.

Взрыв был произведён в атмосферном воздухе путём разрушения механическим пробойником стеклянной сферы диаметром 5см, наполненной воздухом под давлением 2Мпа (20 атм). Фотография получена через 375 мкс после разрушения сферы. 1-трубка для подачи газа под давлением; 2-разбитая стеклянная сфера; 3-осколок стекла; 4-механический пробойник; С-турбулентный фронт контактной поверхности; S-ударная волна.

Благодаря высокому начальному давлению газ вырывается через разлетающиеся обломки сферы. Вследствие возмущения, внесённого осколками стекла во время прорыва газа, истекающий газ является турбулентным и имеет несимметричную границу, но он создаёт перед собой удивительно симметричную ударную волну. Ясно видна описанная выше чёрно-белая структура ударной волны (так же как и структура турбулентного толкающего газа).

Такой же процесс представлен на фотографии (рис.6), полученный шлирен-методом с использованием электрического разряда в качестве источника света. Сфотографирован взрыв стеклянной сферы диаметром 5 см, наполненной воздухом под давлением 3,7 Мпа (37 атм). Фотография сделана спустя 100 мкс после начала разрушения сферы. Снова ясно видны турбулентный толкающий газ и симметричная ударная волна перед ним. Однако на этой фотографии правая половина по окраске противоположна левой половине, при котором для определения градиентов плотности кромка ножа располагается вертикально. В отличие от теневой фотографии ударной волны, на которой волна изображается в виде чёрной и следующей за ней белой линии, на фотографии, полученной шлирен-методом, ударная волна имеет чёрный или белый цвет в зависимости от направления движения относительно кромки ножа. (Более подробно об этом можно прочесть в книге ). При взрыве сферического заряда ТНТ или другого химического взрывчатого вещества процесс весьма сходен с представленным на рис.6. Взрывчатое вещество превращается в сжатый под высоким давлением раскалённый газ, толкающий перед собой ударную волну. В итоге газ достигает равновесного объёма, а ударная волна, которую уже не толкает расширяющийся газ, будет затухать с увеличением расстояния и превратится, наконец, в звуковую волну.

### **1.1. Гром и молния**

Как уже отмечалось, гром и молния является одним из наиболее часто встречающихся примеров ударных волн, с которыми человек сталкивается на протяжении всей своей жизни. Всех от мала до велика пугают удары, раскаты и грохот грома, особенно вблизи грозового разряда, где возникает один из самых сильных звуков, известных в природе. На рис.. 5 представлена уникальная фотография грозовых разрядов.

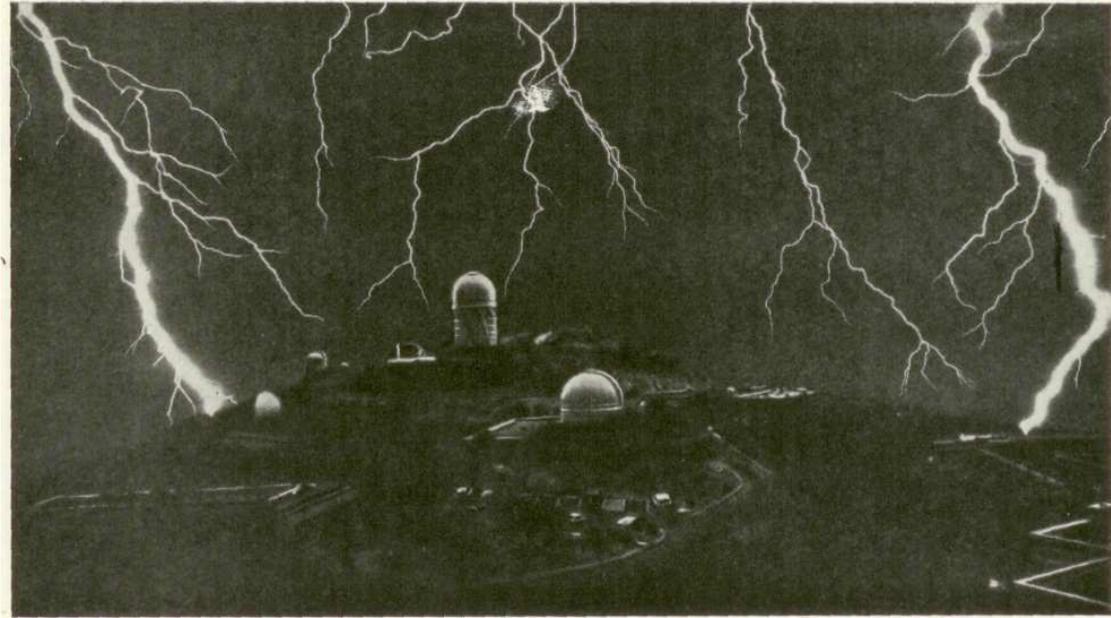


Рис.5. Ударные волны от грозовых разрядов.

Эффектная картина грозы над Китт-Пикской астрономической обсерваторией (шт. Аризона, США). Благодаря 45-секундной выдержке видны только что возникшие каналы разряда (тонкие) и уже расширяющиеся каналы (толстые). От каналов распространяются взрывные, или ударные, волны, которые могут оказывать весьма разрушительное действие вблизи высокотемпературного, находящегося под высоким давлением [ядра Вблизи ударной волны раздаётся пугающий треск, вдали от каналов слышны раскаты грома).

Видны несколько светящихся электрически нагретых каналов и стримеров. Благодаря 45-секундной экспозиции более поздние разряды выглядят тоньше (см. рис. 2 и 3). Установлено, что первоначально канал разряда имеет толщину всего в несколько миллиметров. За 30 мкс он расширяется до нескольких сантиметров вследствие того, что мгновенно высвобождаемая электрическая энергия нагревает, сжимает и ионизирует воздух внутри него. Температура в канале сохраняется на уровне 20 000 °С, а давление за это время падает от 3,5 до 0,5 МПа (от 35 до 5 атм). Максимальные значения давления ещё выше. Понятно, почему находиться вблизи канала рискованно.

На представленной фотографии видны также извилистые каналы и стримеры, возникающие при неоднократных разрядах между облаками и землей. Такие молнии вызывают раскаты и грохот грома. К счастью, в данном случае нанесенный ущерб был невелик. Однако при температурах внутри канала в несколько тысяч градусов и давлениях в несколько атмосфер возможны очень сильные разрушения зданий и даже человеческие жертвы. Некоторые каналы имеют длину в несколько километров, а сила тока в них достигает сотен тысяч ампер. Благодаря очень высоким температурам молекулы воздуха диссоциируют с образованием атомов азота и кислорода, причем некоторые из них ионизованы. Именно эта смесь электронов, ионов и атомов известна под названием плазмы, и газ, который вначале обладал очень низкой электропроводностью, становится прекрасным проводником.

Бенджамин Франклин еще в 1752 г. правильно определил природу молнии как электрический разряд и изобрел громоотвод для защиты строений. Однако, несмотря на то что гроза уже несколько веков занимает умы людей, многое еще предстоит узнать о ее электрических, тепловых и акустических свойствах.

Установлено, что на Земле ежегодно бывает более шестнадцати миллионов гроз и что ежесекундно в атмосфере происходит около ста грозовых разрядов. В некоторых районах мира грозы бывают часто, в других — очень редко (222 раза в году на Яве и 4 раза на побережье Калифорнии). Во время жестоких штормов, торнадо, ураганов погибает много людей и происходят страшные разрушения. Например, огромный циклон и чудовищный цунами, опустошившие некоторые районы Восточного Пакистана (ныне Бангладеш) в 1970 г., унесли от 500 тыс. до 2 млн. человеческих жизней и, возможно, явились одной из самых страшных катастроф в истории человечества. В США урон, наносимый этими явлениями природы, достигает почти 1 млрд. долл. в год. К счастью, с помощью спутников уже удалось спасти жизни десяткам тысяч людей, своевременно предупредив население о необходимости эвакуации из береговых районов, лежащих на пути ураганов. Разработка систем своевременного прогноза и методов борьбы с грозами путем ослабления их мощности и изменения пути следования избавит человечество от этих катастроф.

### 1.2. Землетрясения

На рис. 6 схематически изображено внутреннее строение Земли, каким оно представляется в настоящее время.

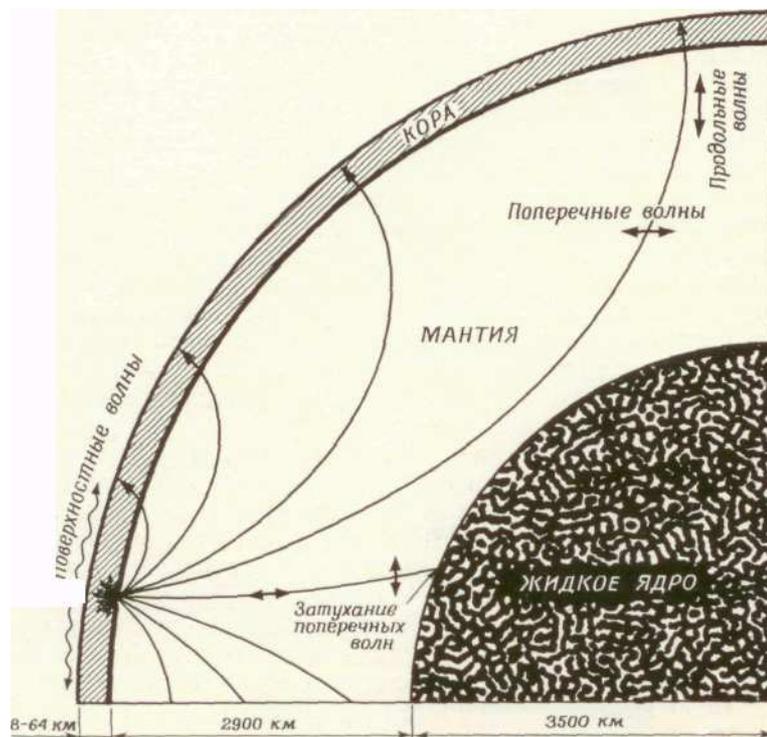


Рис.6. Волны, возникающие при землетрясении или подземном ядерном взрыве.

При землетрясении или подземном ядерном взрыве высвобожденная энергия порождает волны разного типа: поперечные (S) и продольные (P). Изучение этих волн позволяет определить местонахождение и силу источника взрыва.

Полагают, что ядро радиусом  $\sim 3500$  км состоит из соединений никеля и железа. Снаружи оно жидкое, а внутри твердое и имеет температуру  $\sim 4150$  °С. Следующую по величине часть Земли занимает мантия, которую обычно считают твердой, поскольку в ней распространяются сейсмические поперечные волны. Ее температура, возможно, составляет  $\sim 3900$  °С. В связи с тем что в жидкости сейсмические поперечные волны затухают, удалось определить внутреннее строение Земли (а в последнее время и Луны). Сравнительно тонкая, от 8 до 64 км (в среднем  $\sim 16$  км), кора образует твердую внешнюю оболочку. Благодаря давлению и тепловому напряжению вся система находится в постоянном, хотя в отдельных местах очень слабом движении. Одно время считалось, что все землетрясения зарождаются в коре, как показано на фигуре. Однако теперь существует мнение, что источником большинства землетрясений является мантия.

Напряжения, возникающие в мантии благодаря существующим огромным давлениям или в результате подземных атомных взрывов, создают источник, или гипоцентр, землетрясения, которое вызывает подземные удары и колебания поверхности Земли. Ускорение величиной  $1g$  создает сдвиговое перемещение поверхностных слоев Земли от 30 см до 10 м. При таком сдвиге, как наглядно показано на рис. 7, последствия могут быть поистине катастрофическими. Человеческие жертвы обычно бывают вызваны тем, что разрушающиеся здания засыпают обломками тех, кто находился внутри помещений и на улицах. Вряд ли хоть один человек погиб непосредственно от ударной волны, возникшей в земле или индуцированной в воздухе. По оценкам, 24 января 1556 г. в Шенси (Китай) погибло 800 тыс. человек, 11 октября 1737 г. в Калькутте (Индия) — 300 тыс., а 1 ноября 1755 г. в Лиссабоне (Португалия) — 60 тыс. Во время последнего события, которое, возможно, явилось одним из самых сильных землетрясений за всю историю человечества, много человеческих жертв было также в других районах Португалии и в Испании. Около 85 тыс. человек погибло в Мессине (Италия) 28 декабря 1908 г., 95 тыс. — в Токио — Иокогаме (Япония) 1 сентября 1923 г. и более 12 тыс. — в Иране 1 сентября 1962 г. Это только несколько наиболее разрушительных землетрясений из числа зарегистрированных. Считается, что в общей сложности на всей памяти человечества во время землетрясений погибло 14 млн. человек. К счастью, пример! из 100 тыс. толчков, которые случаются ежегодно, только 10 приводят к крупным землетрясениям. Но и при этом каждый год во время одного крупного землетрясения может высвободить столько энергии, сколько во всех остальных землетрясениях вместе взятых. Степень сотрясения на поверхности Земли при землетрясении впервые удовлетворительно определил профессор Рихтер. По шкале Рихтера 7 баллов, например, соответствует сильному землетрясению, сопровождающемуся высвобождением энергии, эквивалентной энергии взрыва 1 Мт ТНТ (или 50 бомб типа сброшенной на Хиросиму). За год происходит только  $\sim 25$

землетрясений такой силы. Самое сильное зарегистрированное землетрясение оценивается 9 баллами по шкале Рихтера (что эквивалентно 1 тыс. Мт, или 10 млн. вагонов ТНТ!). Подземные взрывы порядка 1 Мт соответствуют по шкале Рихтера 7 баллам и выше, а порядка 1 кт — 5 баллам и выше.

При ядерном взрыве (см. гл. 5) огненный шар, находящийся под высоким давлением (миллионы атмосфер) и при высоких температурах (миллионы градусов по Цельсию), порождает сильнейшую подземную ударную волну, способную превратить в пар окружающую породу. Возникшая ударная волна затем быстро затухает с расстоянием. Однако неясно, возникают ли также ударные волны в очаге землетрясения. Хотя при большом землетрясении высвобождается огромное количество энергии, в отличие от подземного ядерного взрыва она распределяется в большом объеме, и сильные ударные волны, возможно, образуются не при каждом землетрясении. Однако в обоих случаях исходные типы волн превращаются затем в классические упругие [продольные]



Рис..7. Разрушения, произведенные землетрясением.

Поиски оставшихся в живых среди развалин, вызванных землетрясением, происшедшим в западной Сицилии в январе 1968 г. Разрушения служат мрачным напоминанием о страшной силе этого явления природы.

<(P) и поперечные (5)1, а также поверхностные волны. При ядерном взрыве первоначальное движение, зафиксированное сейсмографом, всегда направлено от источника, в то время как при землетрясении оно может быть направлено и к источнику. Амплитуды и длины волн, распространяющихся от обоих источников, также отличаются по величине (при взрывах амплитуда волн меньше). Однако не существует абсолютно надежного способа,] позволяющего различить взрывы и землетрясения, в случае, когда! источник расположен в такой, например, сейсмоопасной зоне,! как Алеутские острова. Пренебрегая такой маловероятной возможностью, сейсмологи уверены, что контроль за выполнением договора о запрещении подземных ядерных взрывов мог

быть вполне осуществим и, если бы этот договор был заключен, он явился бы важным шагом на пути к всеобщему разоружению.

P-волны — это возмущения сжатия и расширения в направлении движения волны (двухполупериодные или продольные волны). S-волны смещают частицы перпендикулярно к направлению своего движения и известны под названием поперечных, сдвиговых волн или толчков. Оба эти типа волн, называемых также внутренними волнами, распространяются в земной коре и мантии. Изучение пути их распространения позволяет сейсмологам определить фокус, гипоцентр, или источник землетрясения или термоядерного взрыва, а также проекцию гипоцентра на поверхность Земли, называемую эпицентром. Поверхностные волны напоминают волны, возникающие в воде, причем известны два или три их типа. Они распространяются со скоростью 600—900 м/с в зависимости от типа почвы. Однако продольные волны внутри Земли имеют самую большую скорость (10 км/с) и первыми достигают любой точки. За ними со скоростью 5,6 км/с следуют толчки, или вторичные волны. Тот факт, что S-волна не отражается от ядра, свидетельствует о том, что ядро должно быть жидким или газообразным, и позволяет измерить его диаметр (фиг. 6). Однако мантия является достаточно «твердой» и в ней распространяются P и S-волны. Следует заметить, что движение, вызванное волнами, затухает с удалением от источника (землетрясения или подземного взрыва) по мере того, как энергия рассеивается в возрастающей массе охватываемого волной вещества.

Землетрясение сопровождается множеством звуков различной интенсивности в зависимости от расстояния до источника. Вблизи от источника слышны резкие звуки, как при разломах глыб породы; на некотором удалении от него звуки напоминают раскат грома или гул взрыва, а иногда вообще ничего не слышно. В горах возможны обвалы и лавины. Когда землетрясение происходит под водой, возникают огромные волны возмущений — цунами. На скалистой прибрежной отмели цунами замедляются. Однако огромные массы воды над отмелью продолжают нестись вперед, создавая огромные волны прилива. Зарегистрированы цунами высотой более 60 м, вызвавшие страшные разрушения в своем стремительном набеге на берег. В открытом море высота цунами не превышает 30 см, но расстояние между гребнями может достигать сотен километров. Именно эта громадная масса воды, движущаяся иногда со скоростью более 180 м/с, является источником гигантской разрушительной энергии волны. Поверхностные волны типа штормового нагона, вызванные ураганами и тайфунами в зонах сильно пониженного давления, имеют сходный вид и могут быть в такой же мере разрушительными [как, например в Бангладеш (Восточный Пакистан) в 1970 г.]. При цунами, ни штормовой нагон не являются приливными волнами, так как они не связаны с обычными приливами на Земле, которые обусловлены силами лунного (и солнечного) притяжения.

Некоторые районы земного шара особенно сейсмоопасны. Например, в Токио уже сейчас принимаются меры для уменьшения числа жертв возможного землетрясения, ожидаемого в 96-х годах и равного по масштабу событиям 1923 г. Учитывая, что численность населения в районе Токио — Иокогама составляет ~12 млн. человек, ясно, что при подобном землетрясении может погибнуть до 1 млн. человек. Трудно осознать масштабы подобной катастрофы.

Стоит также заметить, что недавние исследования в шт. Калифорния показали, что в ближайшие три десятилетия в результате землетрясений в этом районе число жертв может составить 50 тыс. человек, в четыре раза больше людей могут получить ранения, а ущерб от разрушений может исчисляться в 20 млрд. долл. Очевидно, что исследования в этой области имеют жизненно важное значение для сокращения этих предполагаемых ужасных потерь. Исследования, проведенные в последние годы, дают основания надеяться, что своевременное предсказание на основе научной регистрации предвестников землетрясений такого масштаба — дело ближайшего будущего.

### **1.3. Извержения вулканов**

Струи пара, горящие газы и твердая порода, извергаемые вулканами, представляют собой грандиозное зрелище, а ударные волны, порожденные этой быстро движущейся массой, могут быть слышны на больших расстояниях. Прекрасным примером может служить извержение на Кракатау, необитаемом острове вулканического происхождения между Явой и Суматрой. На фиг. 10 показаны начальные стадии извержения в мае 1883 г. и карта слышимости ударных волн 26—27 августа 1883 г. Окружности с центром в источнике ударных волн расположены на расстоянии 1120 км друг от друга. Видно, что взрыв был слышен на расстоянии более чем 4800 км от источника. По приблизительным оценкам в атмосферу было выброшено 4,6 куб. км продуктов извержения, для чего потребовалась энергия, эквивалентная энергии взрыва 5000 Мт ТНТ (250 тыс. бомб типа сброшенной на Хиросиму). Извержение привело к полному уничтожению и исчезновению двух третей острова. Вулкан, который до извержения имел высоту 820 м, опустился ниже уровня моря, и в результате возник чудовищный цунами высотой в 45 м, обрушившийся на Яву и погубивший более 36 тыс. человек.

Когда вершина вулкана взлетела на воздух, мельчайшие частицы пыли поднялись на высоту более 39 км. Пыль изменила характер солнечного излучения, что привело к понижению температуры на Земле и вызвало необычайно яркие закаты на всей планете.

На рис. 8 показано сильное извержение вулкана, происшедшее недавно в Исландии. На фотографии видны столб дыма и пара, поднимающийся из раскаленного жерла вулкана на высоту до 9 км, и потоки кипящей лавы, устремившейся в море с небольшого островка Хеймаэй, расположенного в 10 км от юго-западного

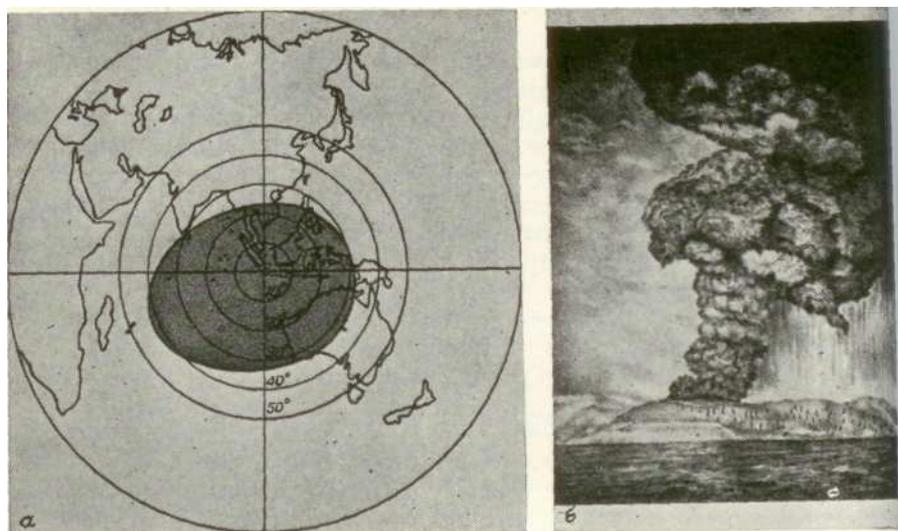


Рис. 8.. Извержение вулкана Кракатау.

На рисунке, сделанном 27 мая 1883 г., изображен вулкан Кракатау на ранних стадиях извержения (рис. 8, б). (Обратите внимание на сходство с фотографией, приведенной на рис. 9.) Настоящее извержение произошло 26—27 августа 1883 г., при этом высвободилась энергия, эквивалентная "энергии нарыва 5000 Мт ТНТ (или 250 тыс. бомб типа сброшенной на Хиросиму). Взрыв был слышен на расстоянии 4800 км (затемненная область на рис. 8, а). Около 4,6 куб. км осколков было выброшено в воздух, а от приливной волны высотой 45 м погибло более 36 тыс. человек на соседнем острове Ява. побережья Исландии. 1 января 1973 г. пришлось организовать эвакуацию 5-тысячного населения Вестманнаэйара, наиболее важного рыболовецкого поселка Исландии, поскольку лавовые бомбы сожгли и разрушили его. Хотя для многих жителей поселка эвакуация была связана с большими неудобствами и лишениями, никто из них не погиб.

Энергия извержения накапливается в пробке пара и газов, выделяющихся из расплавленной породы (лавы), образующейся в горячем, находящемся под высоким давлением веществе земной мантии. Хотя ударные волны, распространяющиеся из такого источника, могут производить ужасающий грохот, зарегистрировано всего несколько несчастных случаев, связанных с повышением давления и ветром, вызванным этими волнами. Причиной грандиозных пожаров, жертв и разрушений, которыми сопровождается извержение, является раскаленная

лава (1300 С°). Согласно оценкам, на земном шаре существует ~430 вулканов, извергавшихся хотя бы один раз в истории человечества. И 2500 известных извержений 2000 произошли океана, где в настоящее время расположено вулканов.



Мелкие частицы сгорают, превращаясь в хорошо известные нам «падающие звезды», а тела с большой Рис.9. Впечатляющее зрелище извержения вулкана в Исландии.

Огнедышащий вулкан и кипящее море породили, столб дыма и пара высотой до 9 км над островом Хеймаэй (Исландия). Все 5 тыс. его обитателей были благополучно эвакуированы, но извержение нанесло огромный материальный ущерб.

#### **1.4. Падение метеоритов**

В околоземном пространстве встречаются метеороиды (космические осколки), движущиеся с различными скоростями: от скорости' преодоления земного притяжения (11,2 км/с) до скорости ухода из солнечной системы (12 км/с). Если верно, что источником метеороидов служит пояс астероидов, расположенный между Марсом и Юпитером, то их скорости должны ограничиваться именно этими пределами. Однако при прохождении через плотные слои атмосферы они замедляются вследствие аэродинамического сопротивления в результате сжатия в ударной волне и трением массой разогреваются до температуры свечения и видны на небе в виде ярких

светящихся тел с мерцающими и дымящимися шлейфами, образованными испаряющимся (аблирующим) с поверхности веществом метеороидов.

В момент столкновения с Землей скорость метеорита (так называется метеороид, упавший на землю: кроме того, в литературе используется термин «метеор» для обозначения обоих понятий) часто не превышает 180 м/с, т. е. меньше скорости звука в воздухе (339 м/с). В противном случае в плотных слоях атмосферы возникла бы характерная для сверхзвуковой баллистики система ударных волн, которая вызвала бы звуковой удар, напоминающий ружейный или артиллерийский выстрел. Следует заметить, что звуковой удар будет все-таки слышен при падении более крупного метеорита, как в случае возвращения на Землю космического аппарата, даже если его скорость столкновения с Землей меньше звуковой. Ударная волна, образовавшаяся при его движении со сверхзвуковой скоростью в верхних слоях атмосферы, будет продолжать распространяться по направлению к поверхности Земли и будет воспринята на ней как звуковой удар. Считают, что Тунгусский метеороид, взорвавшийся над Сибирью в 1908 г., представлял собой ледяное ядро кометы, которое распалось, не достигнув поверхности Земли. Тем не менее ударная волна, возникшая при его входе в атмосферу Земли, была так сильна, что на площади ~2000 кв. км был повален и сгорел весь лес. К счастью, в этом глухом районе мощнейшая ударная волна, вызвавшая повышение давления и скоростной напор ветра порядка долей атмосферы, не явилась причиной гибели людей. По своему эффекту падение этого метеороида было подобно сильному ядерному взрыву в атмосфере. По оценкам, высвобожденная энергия была равна энергии взрыва атомной бомбы с тротильным эквивалентом 25—250 Мт.

Благодаря большой кинетической энергии крупных метеоритов их скорости могут быть очень велики. При входе таких метеоритов в атмосферу возникают баллистические ударные волны: (как при разрыве снаряда или бомбы). В момент столкновения с землей вследствие мгновенного высвобождения кинетической энергии образуются новые ударные волны, распространяющиеся как в воздухе, так и в земле. Во время этого процесса значительная часть метеорита и почвы в месте его падения испаряются, а многочисленные осколки разлетаются в стороны, образуя кратер. На рис. 10а,б показан Аризонский кратер, образовавшийся, как полагают, в результате падения метеорита с массой 10 тыс. - 100 тыс. т в период 5—50 тыс. лет назад. Если принять, что падавший метеорит весил 60 тыс. т (такой вес имеет железо-никелевая сфера диаметром 24 м и плотностью 8 г/см<sup>3</sup>) и что скорость входа его в атмосферу Земли была равна второй космической скорости, то падение Аризонского метеорита была эквивалентна взрыву

мегатонны ТНТ. Диаметр кратера составляет ~ 1300 м. а максимальная глубина ~. 170 м. • Даже страшно представить, какие последствия вызвало бы падение такого метеорита, подобное взрыву мегатонной атомной бомбы на какой-нибудь крупный город вроде Нью - Йорка (рис. ) Токио или Лондона. При этом разрушения были бы порождены не только самим падением, но и сильной ударной волной, вызвавшей повышение давления на несколько десятков атмосфер и ураганный ветер, который смел бы и уничтожил все по своему пути на огромных площадях.

Самый большой кратер на Земле, происхождение которого не вызывает сомнений, Унгавский расположен на севере провинции Квебек в Канаде (рис.11 ). Его диаметр ~3,5 км. а максимальная глубина достигает ~ 435 м. Считают, что при столкновении с Землей этот гигантский метеорит имел гиперзвуковую скорость (более 13,9 км/с) и его падение «превратило окружающую бесплодную равнину в хаотическое нагромождение породы». по приблизительным подсчетам по воздуху взлетело порядка 5 млрд. т раздробленного гранита.

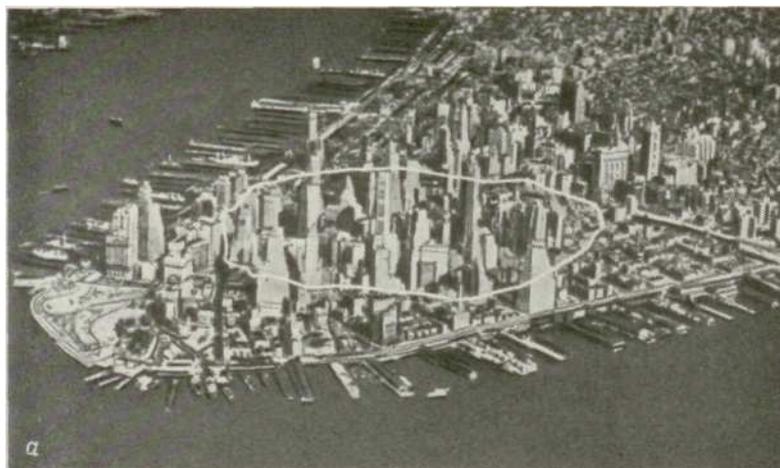
Современные исследования показывают, что на Земле существует не менее 50 круглых впадин диаметром до 60 км, образованных падением метеоритов с гиперзвуковой скоростью. Лунные кратеры во много раз шире, глубже и их больше на несколько порядков. Происхождение кратеров на Земле, Луне, и Марсе связывают с падением на них метеоритов. Однако на этот счет существует много различных мнений, несмотря на исследования Луны астронавтами и исследования Венеры и Марса автоматическими станциями. Марс имеет два спутника Деймос и Фобос, характеризующиеся чрезвычайно интенсивным кратерообразованием.

Стоит упомянуть о недавнем падении метеорита на Луну, случившемся 17 июля 1972 г. Сейсмические станции, оставленные кораблём «Аполлон» на Луне, передали на Землю, что вес метеорита составил ~1 т. В момент столкновения с Луной его скорость составляла 8 км/с и высвобожденная кинетическая энергия была эквивалентна энергии взрыва 7 т ТНТ или 28 т ТНТ, если бы его скорость была 10 км/с. Большой интерес представляет также событие, происшедшее 4 млрд. лет назад. Полагают, что на Луну упал метеорит диаметром 30 или даже 80 км, имеющий скорость 16—32 км/с. Возникшие в метеорите ударные волны и волны разрежения вызвали его разрушение и испарение. Ударные волны и волны разрежения, распространившиеся по Луне, привели к образованию моря обломков, оплавленной породы и кольца гор диаметром 1040 км. Чаша кратера наполнилась лавой, просочившейся изнутри через мантию и кору. Теперь она известна как «Море дождей». По оценкам учёных, высвобожденная энергия

была эквивалентна энергии взрыва миллиарда водородных бомб, интенсивность мгновенной вспышки света при столкновении превысила интенсивность излучения Солнца. Выброшенная порода рассеялась вокруг в радиусе 1600 км, покрыв поверхность Луны толстым слоем, достигающим, 5 км вблизи кратера и нескольких метров на периферии. Часть породы была унесена с Луны в космическое пространство и, как считают некоторые ученые, возможно, даже выпала частично на Землю в виде твердых осколков, или тектитов. Полагают, что возраст Луны, как и возраст Земли, равен приблизительно около 5 млрд. лет. Ее происхождение до сих пор остается загадкой. На ней нет действующих вулканов и, по-видимому, нет ценных природных ресурсов, которые могли бы подлежать разработке в будущем.



а)



б)

Рис. 10 а) Аэрофотоснимок Аризонского кратера (Каньон Дьявола) диаметром ~1300 м и глубиной ~170 м; б) Контур Аризонского кратера наложенный на аэрофотоснимок южной оконечности острова Манхаттан (город Нью – Йорк).

### 1. 5. Взрывающиеся звезды и галактики

Насколько позволяет судить об этом несовершенное современное оборудование, большинство звезд мало изменилось за время наблюдения

людьми. Однако время от времени на том месте, где ранее не наблюдалось никаких объектов, вдруг вспыхивает яркая звезда. Такая звезда называется новой или, в случае исключительной яркости, сверхновой. В течение нескольких часов яркость новой звезды может увеличиться в 50 тыс. раз, а сверхновой — даже в 1 млрд. раз. Считается, что такие явления вызваны взрывами поистине космических масштабов.

Пример такого типа взрывающейся звезды показан на рис. 11. Крабовидная туманность (волоконистая структура этой туманности напоминает щупальца краба) в созвездии Тельца является остатком сверхновой звезды, которая была зарегистрирована Пекинской астрономической обсерваторией в 1054 г. Поскольку эта туманность находится на расстоянии ~4400 световых лет от Земли, сам взрыв произошел ~3400 лет до н. э. Образовавшиеся газы все еще продолжают разлетаться со скоростью ~1300 км/с. В настоящий момент диаметр (расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга почками) туманности составляет ~6 световых лет, примерно на 70% больше расстояния от Земли до ближайшей звезды  $\alpha$ -Цен-тавра (4-103 км). Вычислено, что высвободившаяся энергия была эквивалентна энергии взрыва 25 1038 мегатонных водородных бомб или энергии, излучаемой Солнцем за 1010 лет. Приведенные цифры свидетельствуют об астрономических масштабах космических явлений.

Крабовидная туманность напоминает картину расширяющегося газа, полученную после взрыва в лабораторных условиях стеклянной сферы с заключенным в ней газом, находящимся под высоким давлением (рис. 4). В туманности расширяющиеся газы приводят к образованию бесстолкновительной ударной волны космической ширины в отличие от тонкой ударной волны, возникающей в лаборатории. Взаимодействие ионизированных газов с магнитным полем туманности вызывает электромагнитное излучение в широком диапазоне частот. Эта туманность хорошо известна как источник гамма - лучей, рентгеновского излучения и радиоволн. Предполагают, что внутри нее находится пульсар, или нейтронная звезда.

В настоящее время механизм такого взрыва описывается с помощью следующей модели. Когда термоядерные реакции внутри звезды прекращаются (при этом в ядре звезды накапливается железо), давление газа понижается и звезда под действием сил гравитации коллапсирует, или сжимается, превращаясь в маленький белый карлик; затем сжатие отражается от центра в виде взрыва.



Рис.11. Взрывающаяся звезда.

Крабовая туманность и созвездия Тельца, расположенная на расстоянии ~4400 световых лет от Земли, расширяется со скоростью ~1300 км/с. Вспышка света, означавшая рождение сверхновой звезды, которая произошла ~3400 лет до н. э., была впервые зарегистрирована в 1054 г. в Пекинской обсерватории.

В результате этого взрыва значительная масса звезды выбрасывается в космос, как в случае Крабовидной туманности. Выброшенный газ содержит все элементы до урана, самого сложного элемента, встречающегося в значительных количествах. Элементы, более тяжелые, чем уран, должны были распасться и на Земле не встречаются. Интересно рассмотреть гипотезу возникновения нашей Солнечной системы путем точно такого же скопления выброшенного взрывом газа с образованием планет из выброшенных веществ. Следовательно, Земля, которая вначале была слишком маленькой и горячей, чтобы удерживать водород и гелий, в конце концов приобрела и более тяжелые атомы. Её ядро, которое, как полагают, состоит из жидкого железа, возможно, возникло из извергнутого вещества ядра сверхновой звезды. Наконец, мы можем даже предположить, что жизнь на Земле обязана своим происхождением взрыву (см.

заключительные фразы следующего раздела). В настоящее время считается, что оставшееся вещество взорвавшейся звезды может сжиматься далее до образования стабильной нейтронной звезды. Плотность становится невероятно высокой (10 млн. т/см<sup>3</sup>). Возможно дальнейшее сжатие до размеров, при которых испускаемые или падающие фотоны (свет) захватываются гравитационным полем и не могут покинуть звезду, т. е. возникает так называемая «черная дыра» — загадка, весьма далекая от разрешения. Радиус такой «дыры» астрофизики называют «горизонтом событий». Он легко определяется при заданных: массе звезды и скорости света путем приравнивания центробежной силы, действующей на фотон, силе гравитации и решения уравнения относительно радиуса. Иначе говоря, мы рассматриваем фотон как спутник на круговой орбите.



Рис. 12. Взрывающаяся галактика.

Этот гигантский взрыв произошел ~12 млн. лет назад в центральной области галактики М-82. Такими взрывами, возможно, обусловлены галактические космические лучи, обладающие большой энергией, и радиоволны. Высвобожденная энергия, по оценкам, эквивалентна энергии взрыва  $5 \cdot 10^{42}$ -мегатонных бомб.

#### 1.6. Космологический «большой взрыв»

Некоторые космологи считают, что наша Вселенная возникла 15 млрд. лет назад в результате большого взрыва. В это время (нулевой момент времени) вся материя и энергия Вселенной были сжаты в одну гигантскую бомбу (ядерное, или космическое, «яйцо»), и вследствие некоторой неустойчивости

эта бомба внезапно взорвалась. При этом, безусловно, должен был произойти самый грандиозный взрыв всех времен. Продукты этого гигантского взрыва стали галактиками и, подобно осколкам стекла показанным на рис. 4 и 5, стремительно разлетелись во всех направлениях и продолжают это движение до сих пор. Эта теория была предложена Леметром в 1927 г., а позднее была развита Гамовым, который назвал ее «теорией большого взрыва» или «теорией взрывающейся Вселенной». Теория, выдвинутая в сотрудничестве с Бете и Альфером в 1948 г., является значительно более сложной и объясняет многие процессы на атомном уровне.

В настоящее время Вселенная состоит из ~90% водорода, 9% гелия, а оставшийся 1% приходится на долю более сложных атомов. Более тяжелые атомы образуются в звездных термоядерных реакторах Вселенной. В таком случае ядерное яйцо должно было состоять из водорода, спрессованного в нейтроны с плотностью 10 млн. т/см<sup>3</sup>, как в нейтронной звезде. Однако при взрыве космического яйца произошел бурный процесс распада на отдельные нейтроны, которые в свою очередь распались на первичные атомные частицы — протоны и электроны. Таким образом, в результате столкновений возникли известные нам теперь стабильные атомы, начиная с протона водорода. С уменьшением температуры различные ядра стали притягивать электроны, образуя нейтральные атомы. Громадные скопления атомов по мере удаления от источника космического взрыва могли образовать галактики и звезды. При попытке объяснить с помощью этой теории образование более сложных, чем гелий, атомов возникают некоторые трудности, которые привели к созданию так называемой теории стационарной Вселенной, предложенной Бонди, Голдом и Хойлом, которые предположили, что простой водород был исходным строительным материалом Вселенной, а все остальные атомы возникают в результате столкновений внутри плотных звезд и выбрасываются в межзвездное пространство при взрывах сверхновых звезд,

Процесс большого взрыва показан на рис.13, а — в, где изображены разбегающиеся эллиптические галактики. В предыдущем разделе отмечалось, что сжатие звезды или галактики под действием гравитационных сил порождает сходящуюся волну. Постулируется также, что Вселенная может сжаться, дав начало расширяющейся - сжимающейся (пульсирующей) Вселенной, показанной на рис. 13, г — е, где представлены чередующиеся фазы расширения и сжатия. При этом мгновенно в точке взрыва возникает космическое яйцо. Кроме двух предыдущих образных, но мало подкрепленных доказательствами гипотез, существует уже путая выше

теория стационарной Вселенной (рис. 13, ж –и) Не более доказательная, чем другие теории, она постулирует что по мере расширения галактик водород непрерывно «возникает из ничего», заполняя пустоту так, что наблюдателю Вселенная кажется не изменяющейся ни во времени, ни в пространстве. Последняя космологическая гипотеза была выдвинута Милном. Следовательно, не было «момента возникновения», и Вселенная вечно неизменна. Однако все эти модели не обладают ни притягательностью, ни вдохновением, заключенными в знаменитых словах в Книге Бытия: «да будет...» Несомненно, что в будущем дела у космологов пойдут лучше.

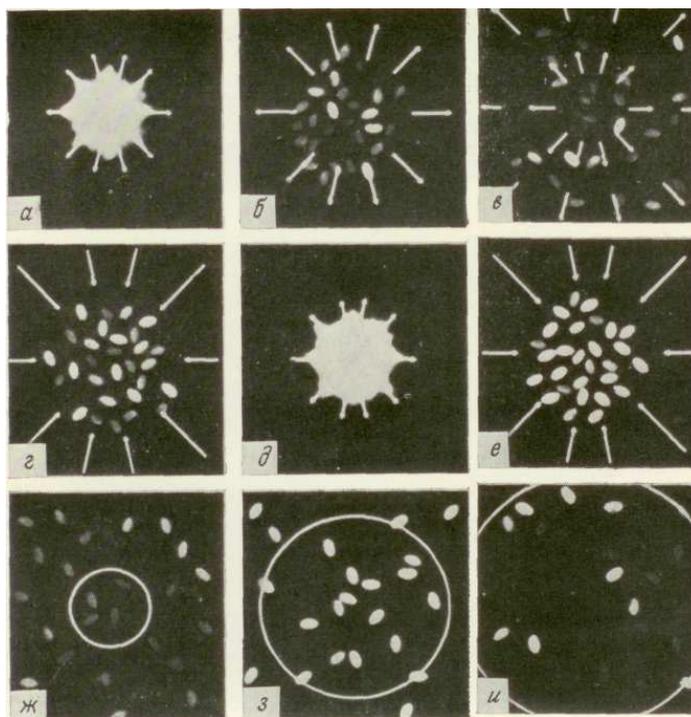


Рис. 13. Теория большого взрыва.

Теория большого взрыва, или взрывающейся Вселенной (а —в), была выдвинута космологами для объяснения возникновению Вселенной. Кроме того, были предложены теории расширяющейся-сжимающейся (пульсирующей) Вселенной (г — е) и теория стационарной Вселенной (ж — и).

## 2. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМЫЕ НА ЗЕМЛЕ

В предыдущей главе на нескольких примерах было показано как ударные волны естественного происхождения влияют на образ жизни людей и сеют смерть в различных географических районах нашей планеты. Человек постепенно учился создавать ударные волны все большей силы, изобретая бич, пращу, порох, более сильные химические взрывчатые вещества и, наконец, ядерные и термоядерные бомбы. С помощью последних ему удалось достичь и даже превзойти степеней разрушений, производимых

некоторыми стихийными явлениям земного происхождения. В настоящее время запасы ядерного оружия, накопленного в мире, угрожают самому нашему существованию. В отличие от некоторых природных катаклизмов гибель людей и разрушения, вызванные искусственно создаваемыми взрывами, происходят непосредственно от перепада давления, порожденного ударными волнами, и ядерного излучения.

### **2.1. Щелчок кнута**

Видимо, раньше всего люди научились получать ударные волны с помощью кнута. Этот резкий, внезапный щелчок очень часто раздавался в прошлом. Им пользуются и до сих пор пастухи при собирании стада животных. Чтобы теперь услышать этот, ставший таким редким звук, нужно пойти в цирк, где выступают укротители зверей. Аналогичные щелчки или хлопки можно получить, проколов, детский воздушный шарик, хлопнув бумажным пакетом или выстрелив из игрушечного духового пистолета. В каждом из этих случаев получается свой характерный звук, который можно количественно измерить с помощью регистрационных микрофонов или датчиков давления.

На рис. 11 и 22 показано, как возникает ударная волна при щелканьи 4-метровым кнутом. Это действие требует известного навыка в передаче мускульной энергии человека скользящей петле (рис. 11). При прохождении петли расплетенный конец кнута мгновенно ускоряется до  $\sim 430$  м/с и действует как толкающий поршень для воздуха, создающий ударную волну. На фотографии показан момент распространения волны со скоростью 670 м/с (удвоенная скорость звука), или  $M=2$ , и ее быстрое затухание. Этот процесс хорошо виден на рис. 12. На теневых фотографиях (а — г) показано, как ускоряющийся кончик кнута возбуждает ударную волну

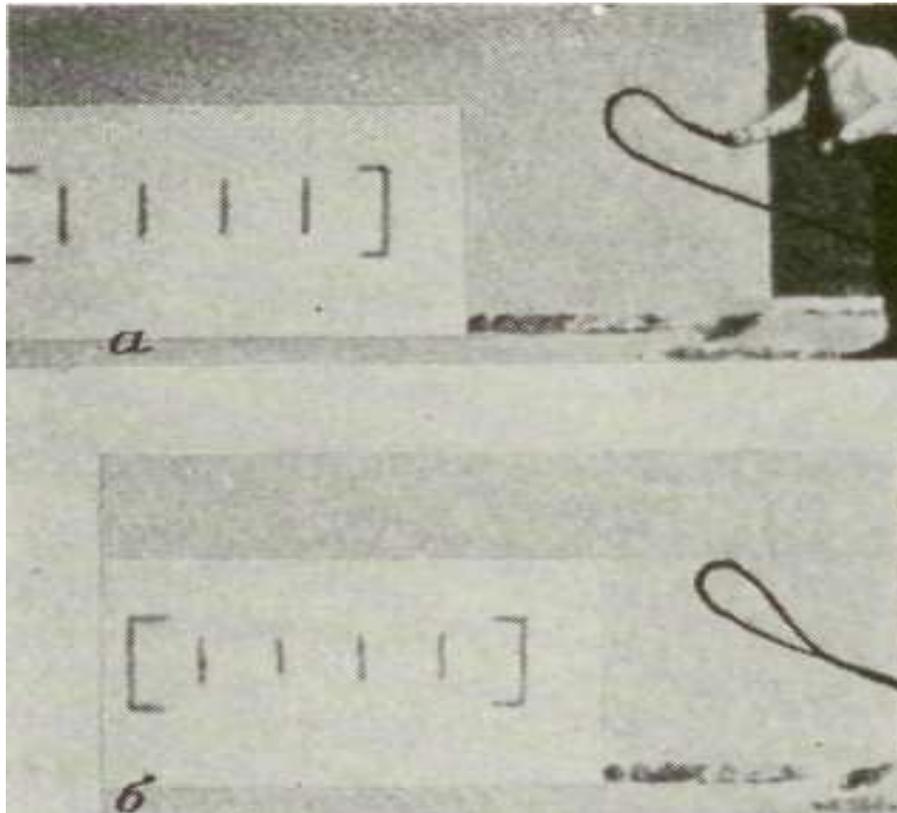


Рис. 11. **Образование ударных волн с помощью кнута.**

Резкий хлопок кнута — это и есть ударная волна. На photographиях (а — б), снятых с частотой 120 кадр/с, показаны подробности образования ударной волны при щёлкании 4-метровым кнутом.

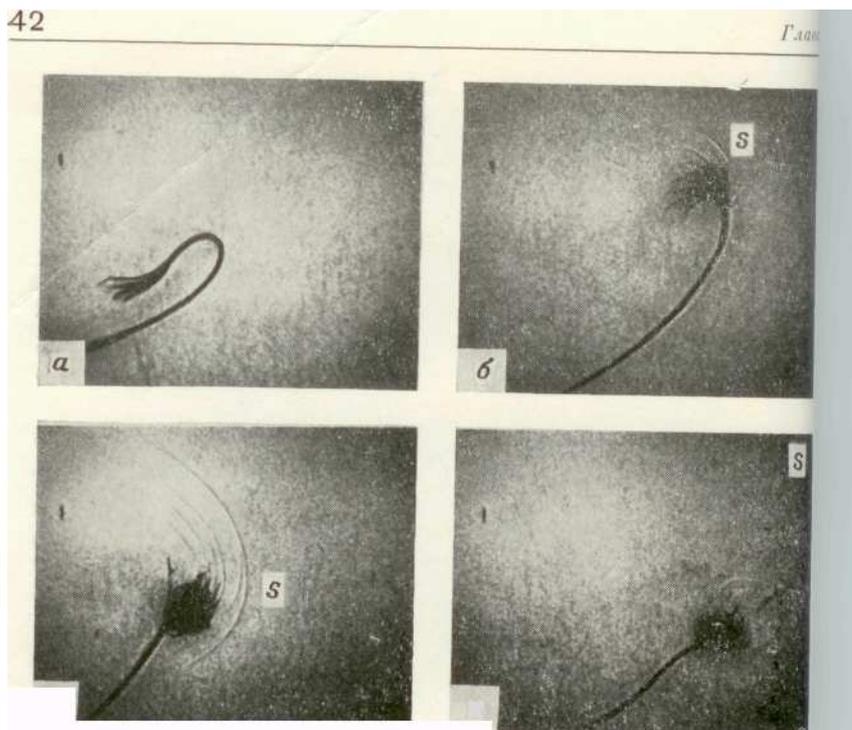


Рис. 12. Ударные волны, образовавшиеся при ударе кнута.

На теневых фотографиях (а — г) ясно видны движение и форма кончика кнута, а также создаваемые им ударные волны (скорость конца кнута 430 м/с, скорость ударной волны 670 м/с, скорость звука в воздухе 335 м/с); S — ударная волна.

## 2.2. Порох

С изобретением пороха и современных химических взрывчатых веществ человек получил возможность создавать с разрушительными или созидательными целями все более и более сильные ударные волны. По-видимому, впервые порох был использован в XIII в. Известно, что в 1627 г. он применялся на угольных шахтах в Саксонии, а в 1689 г. — в Корнуэлле. Он получил широкое распространение в 1831 г. после изобретения плавкого предохранителя.

Альфред Нобель сделал ряд важных открытий по применению ВВ в период с 1867 по 1879 гг.; в частности, он изобрел гремучертутный капсюль - детонатор, динамит, нитроглицерин и взрывчатые вещества различной мощности. За этими изобретениями последовали новые, сделанные другими исследователями; возникли более совершенные виды взрывчатых веществ, электродетонаторы, взрыватели и кумулятивные заряды. В военном деле взрывчатые вещества и горючие составы с малыми скоростями горения используются как инициаторы и ускорители во всех

видах оружия: винтовках, ружьях, ракетных пусковых установках, гранатах, бомбах, торпедах, баллистических неуправляемых ракетах, а также в подрывных работах.

В мирных целях взрывчатые вещества широко применяются в горнорудной промышленности, гражданском строительстве, сельском хозяйстве, машиностроении и при выполнении космических исследований. В горном деле чаще всего их используют для выемки грунта при строительстве шахт, туннелей, штолен и штреков, при добыче полезных ископаемых из шахт, каменоломен и рудников, а также при геофизических исследованиях. В гражданском строительстве их применяют при прокладке туннелей для железных дорог и шоссе, для выемки грунта под котлованы, фундаменты зданий, для сооружения каналов, гаваней. В сельском хозяйстве с помощью взрывчатых веществ роют колодцы, прокладывают ирригационные и дренажные каналы, выкорчевывают пни, ставят сваи, очищают плодородные почвы от камней. В космических исследованиях взрывчатые вещества (пиротехника) применяются для синхронизации, приведения в действие, наддува и выключения различных устройств в заданные моменты времени в течение всего полета корабля от момента взлета до возвращения на Землю. В такой сложной системе как «Сатурн — Аполлон» пиротехнические устройства с большой точностью выполняют десятки операций как во время нормального полета, так и в критических ситуациях, в которых обычная механическая система может отказать. Экипаж космического корабля «Аполлон 13» был спасен именно благодаря такому пиромеханическому устройству, с помощью которого основной блок космического корабля был своевременно освобожден от лунной кабины.

В связи со сказанным уместно процитировать Уорделла (1892 г.): «В задачу данной статьи не входит оценка прямого или косвенного влияния на современную цивилизацию применения взрывчатых веществ в военном деле. Некоторые именитые авторы пошли так далеко, что объявили изобретение пороха следующим по значению открытием после книгопечатания и создания парового двигателя. Тем не менее следует отметить, что в настоящее время взрывчатые вещества находят широкое применение в мирных целях; действительно, не будет преувеличением сказать, что без их помощи многие крупные технические проекты сегодняшнего дня либо оказались бы невыполнимыми, либо потребовали бы огромных дополнительных затрат времени и труда».

На рис. 13—15 представлено несколько типичных фотографий иллюстрирующих некоторые важнейшие свойства химических взрывов. На рис. 13 показан взрыв 20-тонного полусферического заряда ТНТ на испытательном полигоне Управления оборонки исследований в Ральстоне (пров. Альберта, Канада). Видно, как белый турбулентный газ, образовавшийся при взрыве, создал перед собой полусферическую ударную волну подобно тому, как это происходит на рис. 3 и 4. Белые дымовые следы оставлены трассирующими ракетами, используемыми для определения местоположения ударной волны и траекторий частиц, следующих за ней. При естественном освещении во время взрыва ударная волна видна, как на теневом снимке. На рис. 14 показано само устройство 500-тонного заряда ТНТ и фотография его взрыва, полученная с помощью аэрофотосъемки. На рис. 15 виден огненный шар в более поздний момент времени, а положение отраженной взрывной волны можно определить по излому дымовых следов справа.

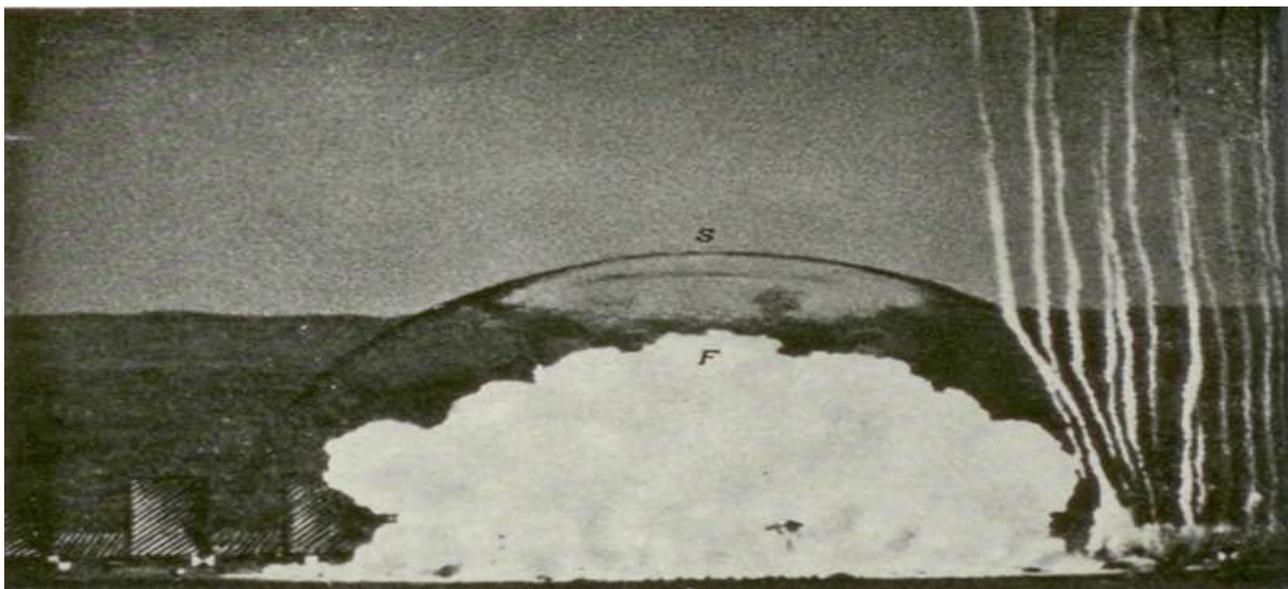


Рис.13. Взрыв 20 – тонной полусферы ТНТ.

Ясно видны: взрывная волна S и огненный шар F, возникающие при взрыве на поверхности земли 20 – тонного заряда ТНТ. Экраны (15x9 м), видные на заднем плане в сочетании с дымовыми следами, оставленными трассирующими ракетами, позволяют различать ударные волны и траектории частиц, а также измерять их скорости. Необычное дневное освещение сделало полусферическую ударную волну видимой.

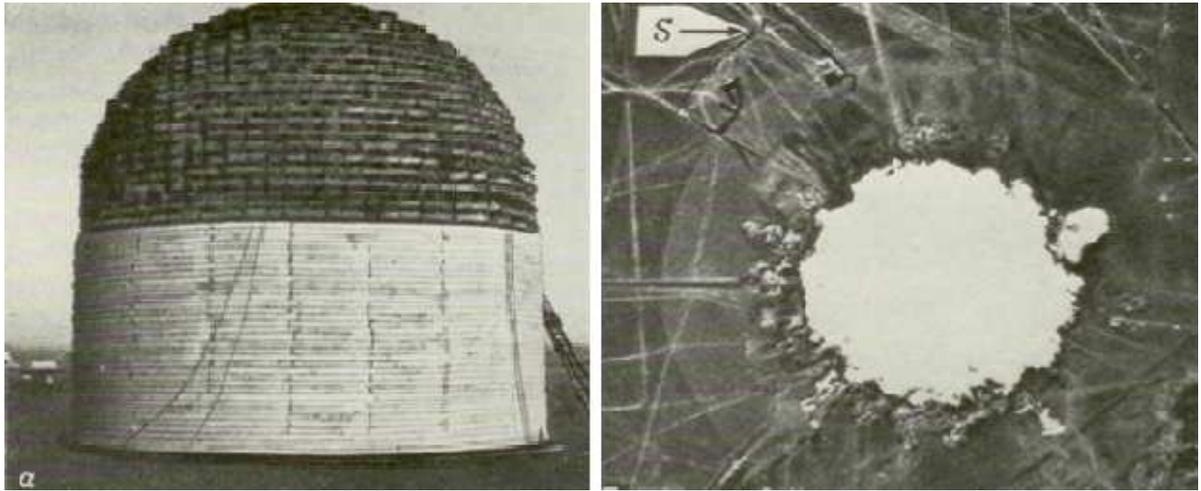


Рис. 14. Взрыв полусферического 500 – тонного заряда ТНТ.

*a* – общий вид 500 – тонного заряда ТНТ, использованного Комиссией по оборонным исследованиям Канады при испытаниях в Прери Флэт (1968 г.) и Дайл Пэк (1970 г.). Заряд установлен на подставке из стирофома; *в* – фотография, полученная с помощью аэросъёмки в Дайл Пэке через 0,7 с после взрыва. Обратите внимание на естественную теневую фотографию ударной волны S на фоне земли и огненного шара, образованного продуктами взрыва.

Производились и более мощные взрывы (1000-тонных зарядов). Во всех этих случаях проводились физические измерения для проверки теоретических расчетов очень больших (ядерных) взрывов. Проверка этих расчетов на практике невозможна в соответствии с договором о частичном запрещении ядерных испытаний. На теневых фотографиях (рис. 16—20), сделанных соответственно через 75, 175, 250 и 400 мкс после воспламенения порохового заряда 7,6-миллиметровой винтовки, видно образование ударных волн, вызывающих внезапный хлопок, или звуковой удар. На рис. 16 показано, как плоская ударная волна, образующаяся при движении пули, сжимающей и нагревающей воздух, находящийся в стволе, выходит из дула и дифрагирует, превращаясь в сферическую ударную волну. Сжатый и нагретый волной газ истекает из дула в виде сверхзвуковой струи. На рис. 17 пуля только что покинула дуло, сопровождаемая горячим находящимся под высоким давлением пороховым газом. Первичная струя со временем становится более турбулентной и вызывает образование слабых ударных волн во всем поле течения. Видна также вторая ударная волна, догнавшая первую выхлопную волну. На рис. 18 показано зарождение сильной ударной волны.



Рис. 15. Огненный шар, образующийся при взрыве ТНТ.

На фотографии виден огненный шар, образовавшийся при взрыве 100-тонного заряда ТНТ через некоторое время после возникновения взрывной волны. Видны также дымовые следы и пыль, поднятая взрывом.

### **3. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В КОСМОСЕ**

В двух предыдущих главах приведено большое число примеров, свидетельствующих о том, что ударные волны на Земле естественного или искусственного происхождения могут оказывать разрушительные действия. Те же ударно-волновые явления, которые постоянно возникают в космическом пространстве среди бесчисленных звезд, туманностей и галактик, хотя и вызывают у людей страх, удивление и волнение, но не приводят к катастрофическим для Земли последствиям.

Огромные массы газообразного звездного и солнечного вещества за счет ядерных реакций имеют внутреннюю температуру порядка сотен миллионов градусов, невероятно высокую плотность и находятся под чудовищным давлением. Расходящиеся волны, возникающие в результате мгновенного выделения тепла в процессе ядерных реакций, могут распространяться от сжатой внутренней части звезды к разреженному газу на внешней её поверхности. При некоторых условиях ударная волна может отразиться в виде сходящейся волны и пойти в обратном направлении. Этот процесс может повторяться и порождать пульсации. Аналогичный эффект может быть вызван взаимодействием между давлением и гравитационными силами. В настоящее время космологи считают, что возникновение нашей Вселенной можно представить как такой процесс чередования расширений и сжатий. Однако пока что эта новая наука — космическая газовая динамика — находится на заре своего развития, и

существующие в настоящее время простые теории, безусловно, подвергнутся многочисленным изменениям по мере получения новых сведений о Вселенной в результате космических исследований и из других источников.

### 3.1. Солнечный ветер

Солнечный реактор выделяет энергию огромной мощности, равную  $4 \cdot 10^{26}$  Вт, а поскольку при взрыве мегатонной бомбы высвобождается энергия  $4 \cdot 10^{15}$  Вт с, то, следовательно, Солнце каждую секунду выделяет энергию, эквивалентную энергии  $10^{11}$  Мт ТНТ. Из этого количества на долю Земли в секунду приходится энергия, эквивалентная энергии взрыва 50-мегатонной бомбы. Этого вполне достаточно, чтобы обеспечить энергией тепловые процессы на Земле (грозы, ветры и т. д.).

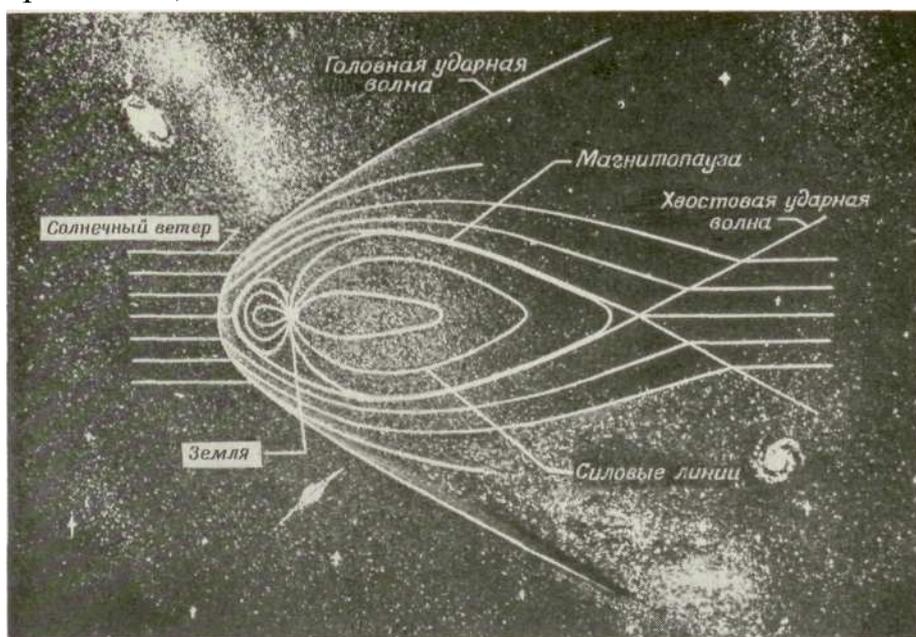


Рис. 16. Течение и магнитосфере.

Ударные волны в космосе, возникающие при взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли.

Образовавшаяся при этом линия тока называется магнитопаузой. Её можно представить в виде граничной линии, на которой дальнейшему проникновению ионизированных частиц в магнитное поле препятствуют силы, возникающие при пересечении этими частицами силовых линий. Внутри области, ограниченной магнитопаузой, находится Земля с радиационными поясами. За её пределами расположена система бесстолкновительных головной и хвостовой ударных волн, как если бы

магнитопауза была моделью, обтекаемой потоком в гиперзвуковой аэродинамической при  $M \approx 10$ . Точка торможения (в вершине магнитопаузы, в которой движущаяся частица останавливается) отстоит на расстоянии  $\sim 20$  радиусов Земли (128 тыс. км) от ее центра, а головная волна — на расстоянии  $\sim 30$  радиусов Земли

Ударная волна в этих разреженных условиях имеет толщину нескольких тысяч километров. Другими словами, эта толщина имеет порядок нескольких циклотронных радиусов ионов, т.е. радиусов вращения иона вокруг силовой линии магнитного поля, и уже не может выражаться через среднюю длину свободного пробега, поскольку это теряет смысл при столь сильном разрежении, когда длина свободного пробега стремится к бесконечности. Действительно, изменения свойств при переходе через ударную волну вызываются теперь не молекулярными столкновениями. Это означает, что присутствие магнитопаузы сказывается на ударной волне не посредством столкновений частиц, как в случае более плотного газа, а посредством электромагнитного взаимодействия. Поэтому такая ударная волна называется бесстолкновительной. Эти взаимодействия разогревают дозвуковую плазму за ударной волной до температур, по меньшей мере в 10 раз превышающих температуру солнечного ветра перед ударной волной.

Хотя рис. 16 в общих чертах дает понятие о течении такого типа, на самом деле формы головной ударной волны и магнитопаузы, согласно данным, полученным с помощью искусственных спутников Земли, намного сложнее и, кроме того, изменяются во времени, поскольку солнечный ветер зависит от активности Солнца. Например, на рис. 17 приведена дополнительная информация о некоторых современных представлениях относительно течения в магнитосфере. Пространство, ограниченное магнитопаузой, напоминает комету с длинным, простирающимся на несколько миллионов километров шлейфом. Луна также показана, но, поскольку она не имеет ни атмосферы, ни магнитного поля, частицы солнечного ветра просто захватываются лунной поверхностью и ударных волн при этом не образуется. Разомкнутые и замкнутые силовые линии магнитного поля определяют несколько областей. Нейтральные точки разделяют силовые линии, замыкающиеся на Земле и продолжающиеся в сторону шлейфа. Нейтральный слой (штриховая линия) разделяет незамкнутые силовые линии, «входящие» в Северный полюс и «выходящие» из Южного.

Поток плазмы начинается на Земле и распространяется вдоль разомкнутых силовых линий магнитного поля к шлейфу. Эта сверхзвуковая струя называется полярным ветром по аналогии с солнечным ветром. Солнечная плазма растекается в основном вокруг магнитопаузы. Однако имеются данные, свидетельствующие о том, что часть солнечной плазмы проникает в атмосферу Земли в районах полюсов через нейтральные точки и шлейф, пополняя радиационные пояса, создавая яркое полярное сияние вблизи земной атмосферы и вызывая радиопомехи. Механизм этих процессов пока еще недостаточно ясен. Кометы, пролетая вблизи Солнца, вполне могут создавать аналогичные потоки.

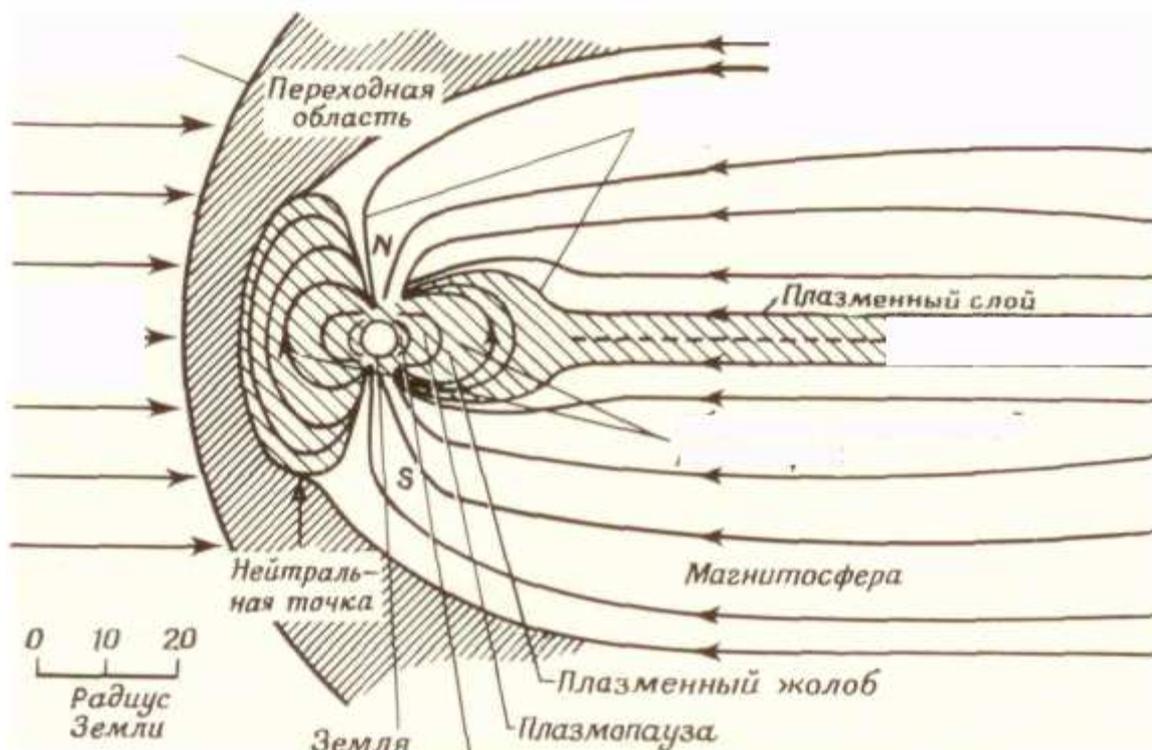


Рис. 17. Более подробная картина течения в магнитосфере. Тороидальная модель магнитного поля Земли, отражающая современные представления ученых, сложившиеся в результате десятилетних исследований в космосе

### 3.2. Солнечные вспышки

Солнце, диаметр которого почти в 2 раза превышает диаметр околоземной орбиты Луны, представляет собой бурлящую массу высокотемпературных ионизированных газов, пронизанную электромагнитными полями. Ее движения весьма сложны и недостаточно хорошо изучены. Они еще более усложняются поверхностными взрывами,

происходящими за счет энергии магнитного поля во время пятнообразовательной активности Солнца, которая, по-видимому, является причиной солнечных вспышек. На рис. 18 показана фотография такой вспышки, вырвавшаяся на 176 тыс. км в космос со скоростью  $\sim 1490$  км/с. Частицы ионизированного газа «вморожены» в магнитные линии подобно бусинам на нитке, образуя различные петли, видные на фотографии. Громадные энергии, связанные с электромагнитным излучением и движением частиц, при некоторых вспышках могут быть соизмеримы с энергией взрыва миллиардов мегатонных бомб. Многие вспышки поднимаются выше, чем показано на рис. 18, и некоторые из них могут быть представлены моделью, приведенной на рис. 19.

При сильных вспышках возникает электромагнитное поле в виде ультрафиолетовых, видимых, рентгеновских лучей и радиоволн, которое распространяется со скоростью света и примерно через 8 минут достигает Земли. Некоторые космические лучи (полностью ионизированные, обладающие большой энергией ядра или нуклоны водорода, гелия и других элементов) могут достигнуть Земли несколько позже. Однако, как показано на рис. 19, масса ионизированного газа, имеющего температуру порядка 1 млн.  $^{\circ}\text{C}$ , захваченная силовыми линиями магнитного поля Солнца, ведет себя подобно поршню, движущемуся со скоростью  $\sim 990$  км/с.

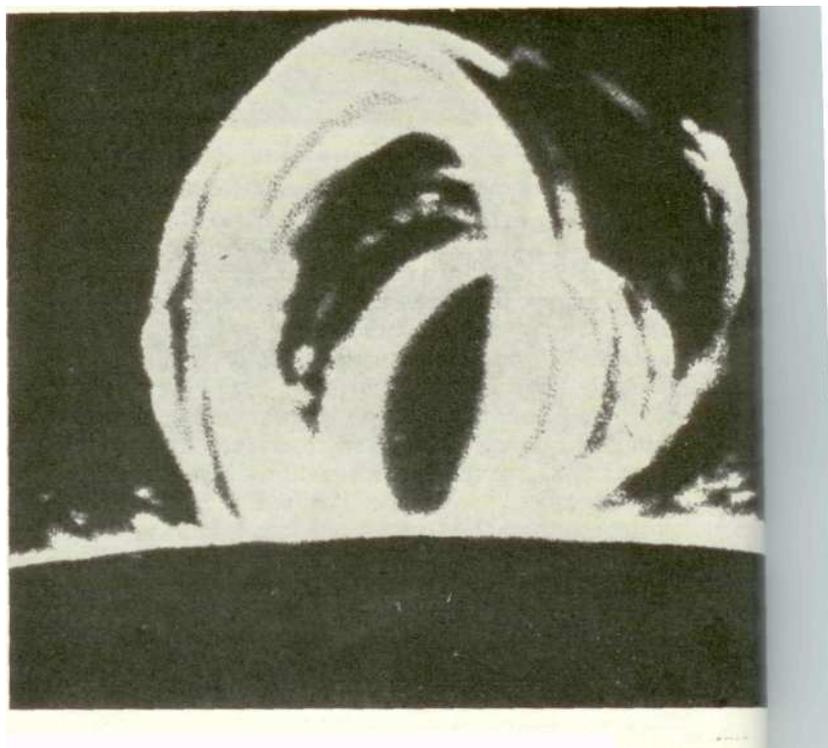


Рис. 18. Солнечная вспышка.

Петля протуберанца, вызванного интенсивным магнитным полем в районе солнечного пятна, простирается на 176 тыс. км в космосе.

Этот расширяющийся тупоносый каплевидный поршень создает сильную бесстолкновительную головную ударную волну толщиной во много тысяч километров. Достигая Земли, эта ударная волна и ионизированные газы вступают во взаимодействие с магнитным полем планеты. Они охватывают Землю и защищают ее от галактических космических лучей, обладающих возможно более высокой энергией, чем солнечные космические лучи. При проникновении галактических космических лучей через натянутый солнечный магнитный экран возникают волны Альвена (названные в честь лауреата Нобелевской премии Х. Альвена), подобно тому как возникают волны при ударе по струнам. Хотя отношения температур и давлений при переходе через головную ударную волну весьма значительны, газ настолько разрежен, что вряд может повлиять на физическое состояние нашей атмосферы. Однако ионизированный газ оказывает сильное влияние на радиосвязь и возникновение полярных сияний. Кроме того, для астронавтов и будущих пассажиров гиперзвуковых лайнеров, летающих на больших высотах, существует опасность получить недопустимо высокую дозу радиации. Эта опасность усугубляется, несмотря на защитное действие магнитосферы в диапазоне энергетического проникающего излучения, будь то электромагнитное излучение (например, рентгеновские лучи) или быстро движущиеся нуклоны или электроны.

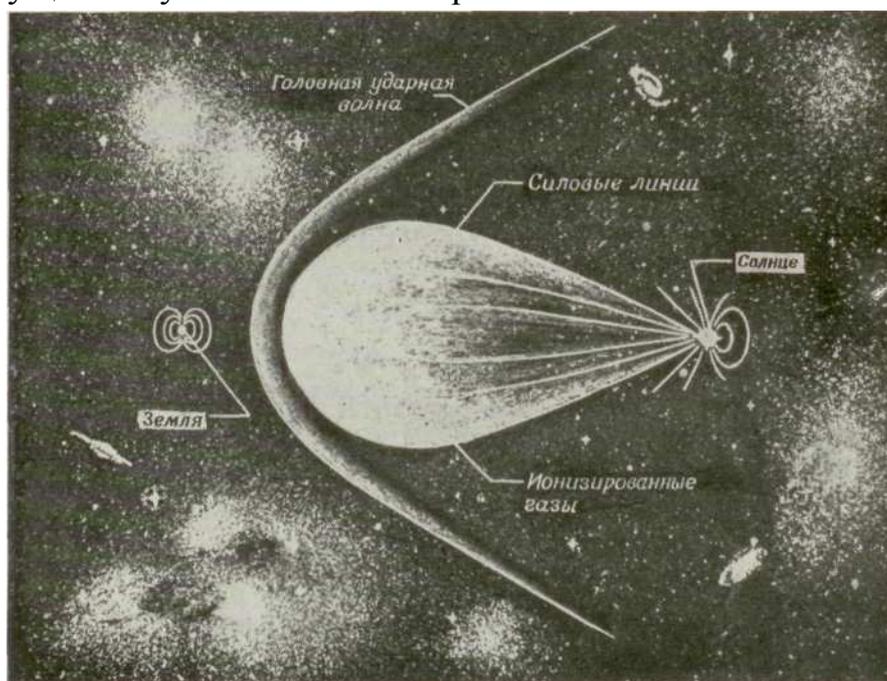


Рис. 19. Взрыв на Солнце.

Ударная волна в космосе, вызванная извержением на Солнце. На рисунке показан поток полностью ионизированных нуклонов, движущийся вдоль силовых линий магнитного поля Солнца, который, подобно поршню, толкает ударную волну.

Недавно сильнейший взрыв вызвал грандиозную солнечную вспышку, которую смогли наблюдать и исследовать 5 сентября 1973 г. астронавты, находившиеся на борту орбитальной лаборатории «Скайлэб 2». В течение 20 мин, после того как вспышка достигла максимума, на огромных площадях земной поверхности была полностью прервана радиосвязь на коротких волнах. Такая вспышка была бы опасна для экипажа корабля, направляющегося к Луне, но была расценена как неопасная для экипажа лаборатории «Скайлэб» вследствие защитного действия магнитосферы. Согласно оценкам, энергии этого взрыва хватило бы для покрытия всех энергетических потребностей на Земле в ближайшие 500 лет. При современном потреблении 1015 кДж/сут эта эквивалентна энергии взрыва бомб с тротиловым эквивалентом ~50 млн. Мт! Как отмечалось выше, некоторые вспышки могут быть в тысячи раз мощнее.

Трудно предсказать, когда возникнет солнечная вспышка. Зона каждого солнечного пятна может рассматривать потенциальный источник извержения, способного достичь Земли в период от 2 до 7 суток после извержения, считая от центрального меридиана. Аналогичные явления наблюдаются у так называемых вспыхивающих звезд. Понимание механизма этого процесса на Солнце, безусловно, позволит объяснить сходные явления в других частях Вселенной, которые до сих пор занимают умы астрономов и астрофизиков.

Следует также отметить, что корона, т. е. разреженный внешний слой Солнца, имеет асимметричную форму во время минимальной активности солнечных пятен (рис. 20) и сияет симметрично во время их максимальной активности (что можно наблюдать при солнечном затмении). Полагают, что причиной симметрии могут служить ускорение и нагревание, связанные с ударными волнами.

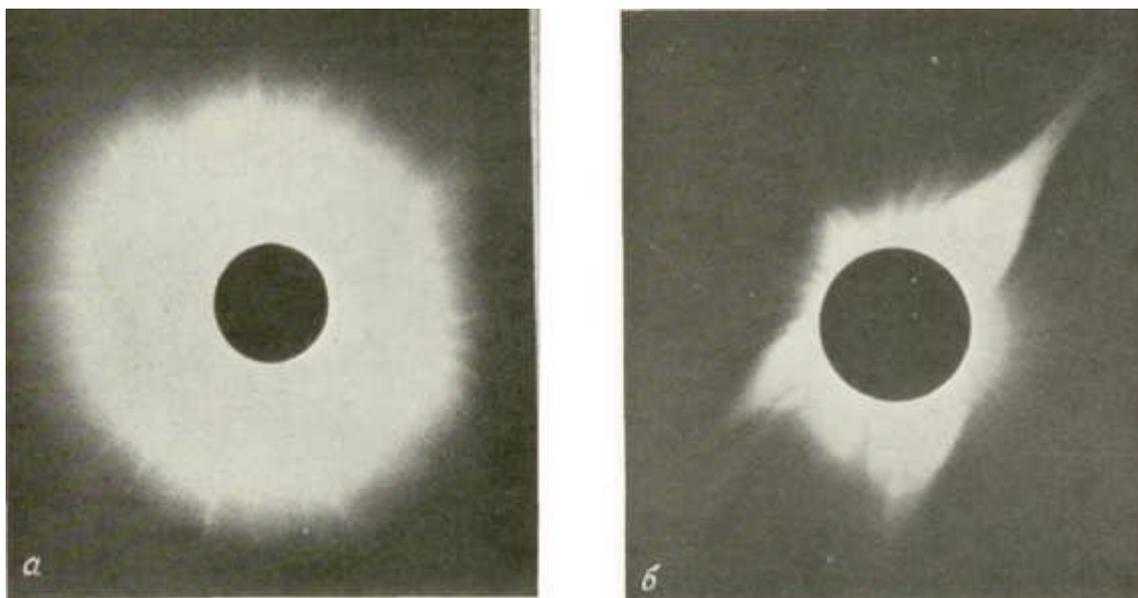


Рис. 20. Нагревание солнечной короны ударной волной.

Хорошо видны существенные различия в форме короны во время: а — максимальной активности солнечных пятен (1947 г.); б — минимальной активности солнечных пятен (1952 г.). Эти различия объясняют нагреванием ударной волной, приводящим к увеличению симметрии. Температура плазмы в солнечной короне составляет  $\sim 1$  млн.  $^{\circ}\text{C}$ . Температура на поверхности Солнца  $\sim 6$  тыс.  $^{\circ}\text{C}$ .

#### **4. Параметры (характеристики) ударных волн**

Согласно Ветхому завету [1] (рис.21) и проведённым в настоящее время двумерным газодинамическим расчётам на Супер – ЭВМ (рис. 22), в результате высокоскоростного удара прочного камня, выпущенного из пращи Давида, о голову великана Голиафа, в последней возникла ударная волна (волна напряжений) с амплитудным давлением на фронте порядка 1,5 Кбар. Это давление более чем в два раза превышало прочность лобовой кости Голиафа, что и решило исход дуэли к вящей радости войска и народа Израилева.

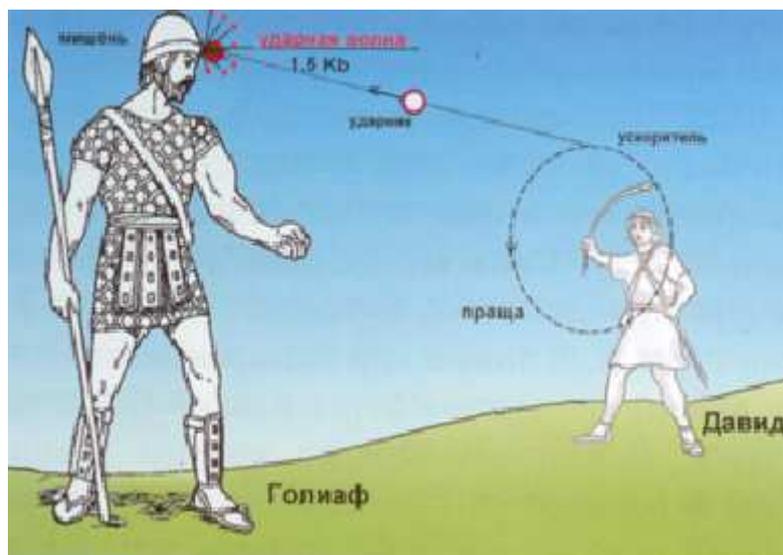


Рис. 21. битва Давида с Голиафом [1], ~Ю00 лет до н.э.  
Библия, Ветхий завет, книга Царств

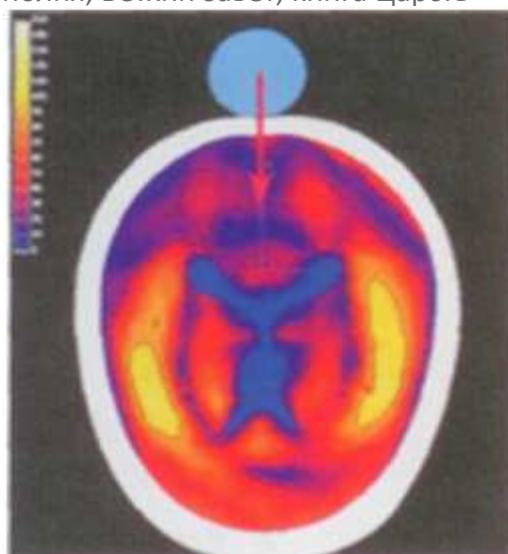


Рис. 22. Компьютерное моделирование удара камня по голове Голиафа ( $d \sim 10$  см,  $m \sim 500$  гр,  $v \sim 20$  м/сек), выпущенного из пращи Давида

Успешно реализованная тогда, эта схема ударного воздействия на различные объекты является основой всех последующих экспериментов в области динамической физики высоких давлений.

Применение более мощных и более изощрённых систем ускорения твёрдых тел – химических и ядерных ВВ, пороховых, легкогазовых, электродинамических и комбинированных на их основе «пушек», потоков заряженных частиц, лазерного и рентгеновского излучений и т.п. – позволили со времён Давида поднять существенно скорость метания ударников на три – четыре порядка величины, а давление в ударной волне – на шесть – восемь порядков, достигнув давлений мегабарно – гигабарного диапазона.

#### 4.1 Ударные волны в сплошных средах

Ударная волна – это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. Ударные волны называют также сильными разрывами или скачками.

Изучение законов распространения ударных волн в металлах имеет большое теоретическое и практическое значение. Материалы таких исследований дают нам сведения об уравнении состояния твердых тел в области высоких давлений, что весьма важно практически [3].

Основной характерной чертой, определяющей поведение твердых и жидких тел при сжатии их ударными волнами, является сильное взаимодействие атомов (или молекул) тела друг с другом, Радиус действия межуатомных сил весьма ограничен. Он порядка размеров самих атомов и молекул, т. е. порядка  $10^{-8}$  см. В достаточно разреженном газе, где средние расстояния между частицами много больше размеров частиц, взаимодействие проявляется в основном только при столкновениях, в момент тесного; сближения атомов или молекул. В твердом и жидком телах атомы или молекулы находятся на близких расстояниях друг от друга и сильно взаимодействуют. Это взаимодействие, в частности, и удерживает атомы в теле. Силы взаимодействия имеют двойкий характер. С одной стороны, частицы, разделенные достаточно большим расстоянием, притягиваются друг к другу; с другой стороны, при более тесном сближении в результате проникновения друг в друга электронных оболочек атомы отталкиваются. Равновесные стояния, на которых находятся атомы твердого тела в отсутствии внешнего давления, соответствуют взаимной компенсации сил притяжения и отталкивания, т. е. минимуму потенциальной энергии взаимодействия. Для того чтобы развести атомы на большие расстояния, необходимо преодолеть силы сцепления и затратить энергию, равную энергии связи, которая для металлов имеет порядок нескольких десятков или сотен ккал/моль. Чтобы сжать вещество, необходимо преодолеть силы отталкивания, которые чрезвычайно быстро возрастают при сближении атомов.

Для того чтобы сжать холодный металл на 10%, необходимо приложить к нему внешнее давление порядка 105 атм.; сжимаемость обычно уменьшается при повышении давления. Для сжатия металлов вдвое требуются давления порядка нескольких миллионов атмосфер.

Таким образом, при сильном сжатии конденсированного вещества (жидкости или твердого тела) в нем развивается колоссальное внутреннее давление, даже в отсутствие всякого нагревания, только за счет отталкивания атомов друг от друга. Существование этого давления нетеплового происхождения, совершенно не свойственного газам и определяет основные особенности поведения твердых и жидких тел при сжатии их ударными волнами. В ударных волнах очень большой амплитуды происходит сильное нагревание вещества, приводящее к появлению давления, связанного с тепловым, движением атомов (и электронов), которое называют «тепловым», в отличие от упругого, или «холодного» давления, обусловленного силами отталкивания [3].

Если амплитуду ударной волны устремить к бесконечности, относительная роль теплового давления возрастает и в пределе упругое давление становится малым по сравнению с тепловым. В волнах чрезвычайно большой амплитуды первоначально твердое вещество ведет себя как газ. Однако в ударных волнах с давлениями в миллионы атмосфер, полученными в лабораторных условиях, давления обоих типов сравнимы друг с другом. В менее сильных волнах, с давлением порядка сотен тысяч атмосфер и ниже, упругое давление преобладает. Мала в этом случае и тепловая энергия вещества, сжатого ударной волной. Вся внутренняя энергия, приобретаемая веществом в волне, затрачивается на преодоление сил отталкивания при сжатии тела и сосредоточена в форме потенциальной, упругой энергии. Скорость распространения малых возмущений в конденсированном веществе, в отличие от газов, никак не связана с температурой. Она определяется упругой сжимаемостью вещества.

В газах мерой «силы» волны служит отношение давлений по обе стороны фронта. В твердом или жидком веществе ударная волна с амплитудой даже в сто тысяч атмосфер является «слабой». Такая волна мало отличается от акустической: она распространяется со скоростью, близкой к скорости звука, сжимает вещество всего на несколько или десятков процентов и сообщает ему скорость за фронтом, в десятки раз меньшую скорости распространения самой волны.

Ударные волны возникают при большом ускорении поверхности слоя металла.

Способ получения таких ускорений – детонация взрывчатого вещества, находящегося в контакте с материалом, либо контакт с быстролетящим телом.

В космическом пространстве при высокоскоростном ударе осколка космического мусора с КА в том и другом материале возникают ударные волны. Как правило, материалом в космосе служат различные металлы и их сплавы. Ударные волны возникают не только при движении быстролетающих тел в атмосфере и безвоздушном пространстве. Они появляются при любом взрыве. Именно они приводят к большим разрушениям при высокоскоростном ударе. Ударный фронт математически представляет собой скачок плотности, энергии и энтропии. Физически, конечно, эти величины должны изменяться в течение времени подъема давления, определяемого такими параметрами как теплопроводность, вязкость, однородностью металла.

Ударно-волновые явления сопровождаются образованием многочисленных трещин, сдвиговых деформаций, отколов, соединение которых при различных начальных параметрах завершает процесс пробития пластины.

Из-за чрезвычайной кратковременности высокоскоростного удара порядка  $(10^{-4}-10^{-7})$  секунд и его разрушительного действия в настоящее время основными источниками экспериментальной информации о динамике всего процесса удара являются: скоростная оптическая съемка (обычная и лазерная), импульсное многократное рентгенографирование и фиксация давлений и скоростей преград.

Ослабить сильную ударную волну очень трудно, хотя и заманчиво - решение этой задачи открыло бы большие перспективы .

#### **4.2. Параметры ударных волн**

Используя представления механики сплошных среды, зону ударного перехода можно представить как геометрическую поверхность, на которой терпят разрыв функции параметров, характеризующие состояние и движение этой среды. Для простоты представления и выведения законов сохранения массы, импульса и энергии на фронте ударной волны в качестве среды используют газ, хотя это не принципиально. Возьмем газ с постоянной плотностью ( $\rho$ ) и давлением ( $P$ ), который начинают сжимать с постоянной скоростью  $U$ . Найдем неизвестные величины: плотность и давление газа в сжатой области  $P_1$ ,  $\rho_1$ , а также скорость распространения разрыва (ударной волны) по невозмущенному веществу  $D$ , исходя из общих законов сохранения массы, импульса и энергии. К моменту  $t$  в столбе с сечением в  $1 \text{ см}^2$  движение охватывает массу газа, равную  $\rho_0 D t$  .

Эта масса занимает объем  $(D-U)t$ , т. е. плотность сжатого газа удовлетворяет условию:

$$\rho_1(D-U)t = \rho_0Dt \quad (1)$$

Масса  $\rho_0Dt$  приобретает количество движения  $\rho_0Dt \cdot U$ , которое по закону Ньютона равно импульсу сил давления. Результирующая сила, действующая на сжатый газ, равна разности давлений со стороны сжатия и со стороны невозмущенного вещества, т.е.

$$\rho_0Dt \cdot U = (P_1 - P_0)t \quad (2)$$

Приращение суммы внутренней энергии и кинетической энергий сжатого газа равно работе внешней силы, сжимающей газ  $P_1Ut$ :

$$\rho_0Dt \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{U^2}{2} \right) = P_1Ut \quad (3)$$

Сокращая в этих равенства время  $t$ , получим систему трех алгебраических уравнений для определения трех неизвестных величин  $P_1, \rho_1, D$ . Преобразуем эти уравнения таким образом, чтобы с левой стороны равенства стояли параметры вещества перед ударной волной, а с правой – параметры за ударной волной. И получим закон сохранения массы (4), импульса (5) и энергии (6) в виде следующих уравнений:

$$\rho_0U_0 = \rho_1U_1; \quad (4)$$

$$P_0 + \rho_0U_0^2 = P_1 + \rho_1U_1^2; \quad (5)$$

$$\varepsilon_0 + \frac{P_0}{\rho_0} + \frac{U_0^2}{2} = \varepsilon_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{U_1^2}{2}; \quad (6)$$

Вводя удельную энтальпию из уравнения (6.6) получим:

$$\omega_0 + \frac{U_0^2}{2} = \omega_1 + \frac{U_1^2}{2} \quad (7)$$

Полученные уравнения представляют собой записанные в наиболее общей форме соотношения между параметрами до и после ударной волны. Они не содержат никаких предположений о свойствах вещества и являются выражением лишь общих законов сохранения массы, импульса и энергии [3].

#### 4.3. Ударная адиабата конденсированного вещества

Законы сохранения потоков массы, импульса и энергии на фронте ударной волны (4)—(6) имеют совершенно общее значение, безотносительно к агрегатному состоянию вещества, по которому распространяется волна. Поскольку даже в очень слабых ударных волнах давления измеряются тысячами атмосфер, начальным атмосферным

давлением всегда можно пренебречь, считая его равным нулю. Обозначим, как обычно, через  $D$  — скорость распространения ударной волны по невозмущенному веществу, а через  $u$  — скачок массовой скорости во фронте, равный скорости вещества за фронтом (в лабораторной системе координат), если перед фронтом вещество покоится. Опуская индекс  $y$  величин за фронтом, запишем законы сохранения массы и импульса в виде

$$\frac{V_0}{V} = \frac{D}{(D-u)}, \quad (8)$$

$$p = \frac{Du}{V_0}. \quad (9)$$

Исключая из этих уравнений скорость  $u$ , получим

$$p = \frac{D^2}{V_0} \left(1 - \frac{V}{V_0}\right). \quad (10)$$

В качестве третьего, энергетического соотношения возьмем уравнение ударной адиабаты (7) с  $p_0 = 0$ :

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{1}{2} p (V_0 - V). \quad (11)$$

Полная энергия, приобретаемая 1 г вещества в результате ударного сжатия  $p(V_0 - V)$ , распределяется поровну между кинетической  $u^2/2$  и внутренней  $\varepsilon - \varepsilon_0$  энергиями (в системе координат, где невозмущенное вещество покоится). Изменение внутренней энергии в свою очередь складывается из изменений упругой энергии и тепловой.

Рассмотрим сначала ударную волну, распространяющуюся по телу с нулевой температурой:  $T_0 = 0$ ,  $\varepsilon_0 = 0$ ,  $V_0 = V_{0k}$ . Проведем на диаграмме  $p, V$  (рис. 11.6) адиабату холодного сжатия  $p_x(V)$  и ударную адиабату  $p_n(V)$ , которая, естественно, проходит

выше, так как полное давление за фронтом складывается из упругого и теплового.

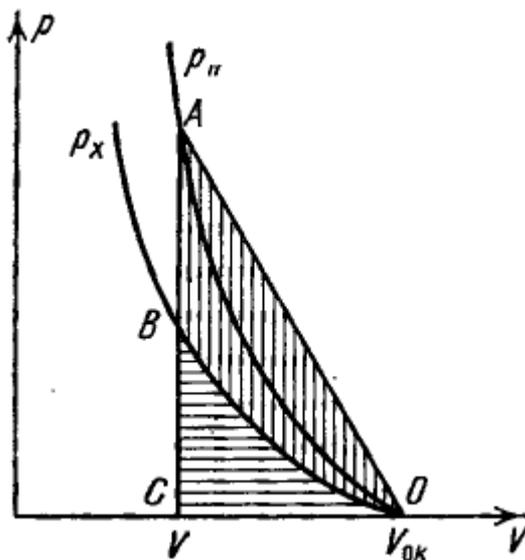


Рис.23.  $p, V$ -диаграмма для сжатия холодного вещества.

$p_n$  -ударная адиабата,  $p_x$  - кривая холодного сжатия.

Упругая энергия  $\varepsilon_x$ , приобретаемая веществом, численно равна площади криволинейного треугольника ОВС, заштрихованного горизонтально  $\left( \varepsilon_x = \int_{\dot{V}}^{V_{0к}} p_x dV \right)$ . Полная внутренняя энергия  $\varepsilon$ , согласно (11), равняется площади треугольника ОАС; разность площадей, заштрихованная вертикально, и составляет тепловую энергию вещества, которое подверглось ударному сжатию. Как видно из рис. 23, площадь ОАС обязательно больше площади ОВС, если только кривая холодного сжатия выпуклая по отношению к оси объемов  $\left( \frac{d^2 p_x}{dV^2} > 0 \right)$ , что обычно всегда и бывает. Поэтому в ударной волне вещество всегда нагревается, и энтропия его повышается. Это совершенно общее положение, наглядно продемонстрированное в гл. I на конкретном примере идеального газа с постоянной теплоемкостью, с не меньшей наглядностью вытекает в случае твердого тела из упругих свойств вещества.

Рассмотрим теперь ударное сжатие тела, первоначально находившегося при нормальных условиях  $V_0, T_0$ . При этом начальное упругое давление отрицательно, и кривая  $p_x(V)$  располагается так, как это изображено на рис. 24.

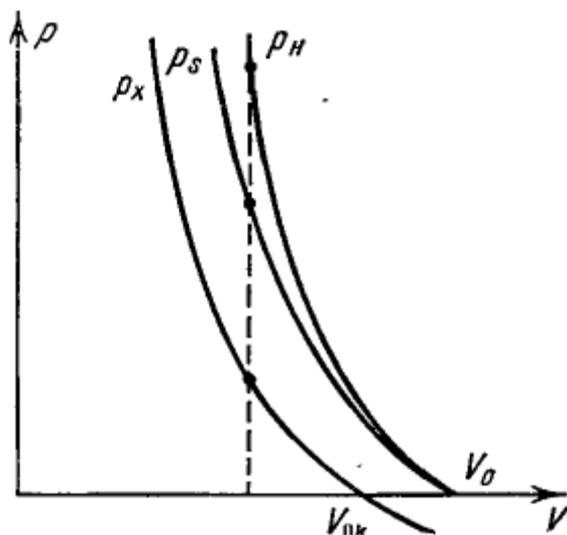


Рис.24.  $p, V$ -диаграмма для ударного сжатия твёрдого тела, нагретого до комнатной температуры.  $p_n$  -ударная адиабата,  $p_s$  - изэнтропа  $p_x$  - кривая холодного сжатия.

холодного сжатия.

Обычная адиабата или изэнтропа  $pS(V, S_0)$ , проходящая через начальное состояние, при уменьшении объема несколько отклоняется вверх от кривой

При небольших сжатиях электронное давление ничтожно мало; коэффициент Грюнайзена можно считать постоянным и адиабата  $pS(V, S_0)$  описывается уравнением (11).

Как известно (гл. I, § 18), ударная адиабата  $p_n(V)$  имеет в начальной точке касание второго порядка с обычной адиабатой  $pS(V)$ , так что

ударная адиабата проходит, как это показано на рис. 24. Рис. 24 выполнен в таких масштабах, чтобы сделать наглядным взаимное расположение всех трех кривых  $p_x$ ,  $p_S$  и  $p_H$  в диапазоне сравнительно небольших давлений до величины порядка сотни тысяч атмосфер. Если рассматривать широкий диапазон давлений до миллионов атмосфер, то различие между  $V_0$  и  $V_{0к}$ , так же как и отклонение обычной адиабаты от кривой холодного сжатия, почти не сказывается, а отклонение ударной адиабаты от изэнтропы  $p_S$  или от кривой  $p_x$  становится значительным вследствие усиления роли тепловых составляющих энергии и давления, или, что то же самое, вследствие заметного возрастания энтропии. Картина при этом такая же, как и на рис. 24, где можно считать  $V_{0к} = V_0$  и адиабату  $p_S$  совпадающей с кривой холодного сжатия.

В ударных волнах с давлениями порядка миллиона атмосфер тепловая энергия, связанная с увеличением энтропии вещества, сравнима с полной энергией. Точно так же тепловое давление сравнимо с полным давлением. Это иллюстрируется рис. 25, взятым из работы [3], на котором представлены экспериментальные ударные адиабаты меди и свинца до давлений порядка  $4 \cdot 10^6$  атм и полученные на основе опытов расчетным путем кривые холодного сжатия (по оси абсцисс отложен не объем, а величина сжатия,  $\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{V_0}{V}$ ).

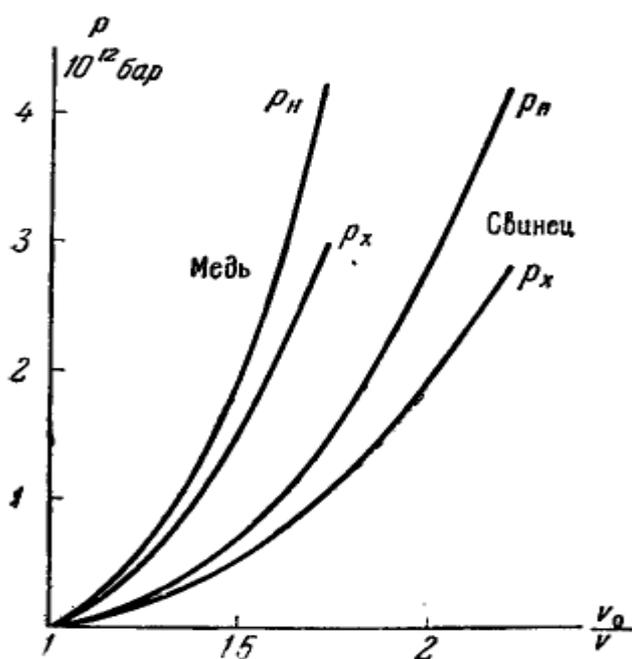


Рис.25. Ударные адиабаты и кривые холодного сжатия свинца и меди.

#### 4.4. Экспериментальные методы отыскания ударной адиабаты твердых тел

Законы сохранения массы и импульса (9), (10) связывают между собой четыре параметра фронта ударной волны: скорость распространения ударной волны по

невозмущенному веществу  $D$ , скачок массовой скорости  $u$ , равный скорости движения сжатого вещества относительно невозмущенного, давление  $p$  и удельный объем  $V$  (или плотность  $\rho = 1/V$ ). Если измерить на опыте скорости  $D$  и  $u$ , то по формулам (9), (10) можно найти давление и объем, а затем, воспользовавшись уравнением энергии (11), вычислить удельную внутреннюю энергию  $\epsilon$ .

Таким образом, задача отыскания всех механических параметров фронта ударной волны сводится к экспериментальному определению каких-либо двух из них, в частности наиболее доступных для измерения кинематических параметров: скоростей  $D$  и  $u$ .

Скорость фронта  $D$  можно измерить на опыте сравнительно просто, регистрируя моменты прохождения фронта ударной волны через известные координатные точки, отстоящие друг от друга на заданном расстоянии. Измерить столь же непосредственным образом скачок массовой скорости  $u$  экспериментально гораздо труднее, поэтому для отыскания второго параметра прибегают к различным косвенным методам, привлекая для этой цели те или иные механические соображения.

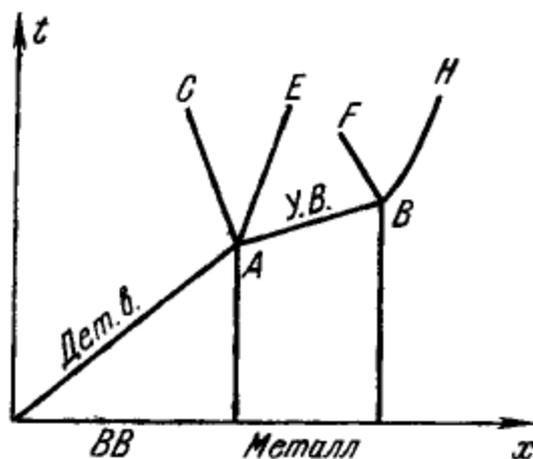
Излагаемые ниже экспериментальные методы исследования сжимаемости твердых тел с помощью мощных ударных волн и измерения параметров фронта были предложены и разработаны Л. В. Альтшулером, К. К. Крупниковым, Б. Н. Леденевым и А. А. Бакановой [3], а также американскими авторами Уолшем и Христианом и др. (последними — за исключением метода «торможения»; см. ниже). Однако советскими учеными был исследован гораздо более широкий диапазон давлений, до 4 миллионов атмосфер.

Мысль об использовании измерения кинематических параметров с целью изучения ударной адиабаты независимо от предыдущих исследователей развивалась в работах Ф. А. Баума, К. П. Станюковича и Б. И. Шехтера, которые проводили измерения со сравнительно слабыми ударными волнами.

В работе [3] описаны три метода измерения параметров ударной волны, сущность которых мы сейчас изложим.

1. Метод «откола» основан на измерении скорости движения свободной поверхности тела, разгружающегося после выхода на поверхность ударной волны, и применении правила удвоения скоростей, согласно которому массовая скорость  $u$  приблизительно равна половине скорости движения свободной поверхности  $u_1$ . Этот метод имеет ограниченную применимость, так как при очень больших давлениях начинаются заметные отклонения от правила удвоения, что приводит к экспериментальным ошибкам в определении  $u$ . Принципиальная схема опыта состоит в следующем.

С зарядом взрывчатого вещества соприкасается плоская пластина исследуемого



материала, как показано на рис. 26 (соответствующая диаграмма движения на плоскости  $x, t$  изображена на рис. 27).

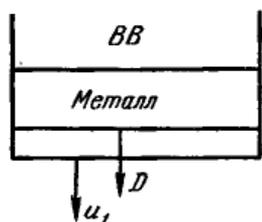


Рис.26. Схема опыта в методе «откола».

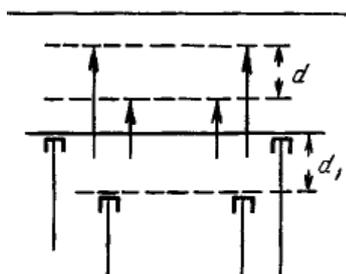


Рис.27.  $x, t$ -диаграмма для «откольного» опыта.

Когда детонационная волна выходит из ВВ на границу с металлом, происходит распад разрыва; по металлу со скоростью  $D$  идет ударная волна (линия АВ), скорость движения контактной границы между ВВ и металлом (линия АЕ) равна массовой скорости металла  $u$  (по ВВ распространяется отраженная волна АС). После выхода ударной волны на свободную поверхность (точка В) снова происходит распад разрыва, по образцу назад бежит волна разгрузки ВF, а граница металла приобретает удвоенную скорость  $u_1 \approx 2u$  (линия ВН). Для измерения скорости фронта  $D$  в работах [3] на определенных расстояниях внутри образца, как показано на рис. 26, устанавливались электроконтактные датчики, которые замыкались в моменты прохождения фронта волны и посылали импульс, регистрируемый с помощью специальной электрической схемы и осциллографа.

Разделив расстояние  $d$  на время, можно было найти среднюю скорость фронта на «базе» измерения  $d$  (базы  $d$  были порядка 5—8 мм, скорости  $D \sim 5—10$  км/сек, время  $\sim 10^{-6}$  сек. Это потребовало разработки специальных методов регистрации столь малых времен). Аналогичным образом с помощью электроконтактных датчиков измерялись и моменты прохождения через заданные координатные точки границы разгружающегося вещества) (см. рис. 26). Электроконтактный метод измерения скоростей был предложен В. А. Цукерманом и К. К. Крупниковым. Таким путем была промерена ударная адиабата железа до давлений  $p \sim 1,5 \cdot 10^6$  атм. ( $D \sim 7,5$  км/сек,  $u \sim 2,4$  км/сек).

Метод «откола» не годится для исследования пористых материалов, так как в этом случае дополнительная скорость  $u'$  при разгрузке оказывается значительно меньше скорости  $u$  и правило удвоения не имеет силы.

2. Метод «торможения». Для изучения более мощных ударных волн, для которых правило удвоения скоростей вносит заметную ошибку, авторами работы [1] был использован другой метод, названный ими методом «торможения».

Данный метод в принципе является абсолютно точным и пригодным для изучения любых материалов, в том числе и пористых.

В этом методе с помощью заряда ВВ разгоняется до скорости  $w$  пластина, сделанная из исследуемого материала. Пластина (ударник  $У$ ) ударяет по другой, покоящейся пластине (мишени  $М$ ), сделанной из того же самого материала. Схема опыта показана на рис. 28, а диаграмма  $x, t$  — на рис. 29.

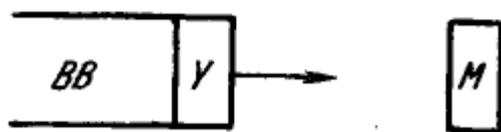


Рис.28. Схема опыта в методе торможения.

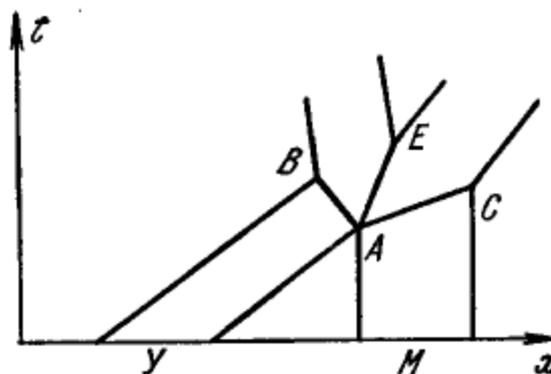


Рис.29.  $x, t$ -диаграмма для опыта с торможением.

В момент удара возникают две ударные волны, распространяющиеся по обоим телам (АВ и АС на диаграмме  $x, t$ ). Давления  $p$  и массовые скорости  $u$  по обе стороны контактной границы между телами одинаковы и равны тем же величинам на фронте обеих ударных волн до тех пор, пока последние не достигают других границ образцов). Той же скоростью  $u$  обладает и сама контактная граница (линия АЕ). Профили давлений и скоростей после удара изображены на рис. 30.

В силу идентичности материалов идентичны и обе ударные волны, т. е. равны скачки массовых скоростей в обеих волнах. Для мишени скачок скорости совпадает со скоростью движения сжатого вещества и, поскольку мишень первоначально покоилась. Что же касается ударника, то перед ударной волной вещество движется со скоростью полета ударника  $w$ , а за волной — со скоростью  $u$ , так что скачок скорости по абсолютной величине равен  $w - u = u$  и  $u = w/2$ . Таким образом, задача сводится к измерению скорости фронта  $D$  в мишени и скорости полета ударника  $w$ . Эта задача экспериментально решается так же, как и в методе «откола», с помощью системы электроконтактных датчиков.

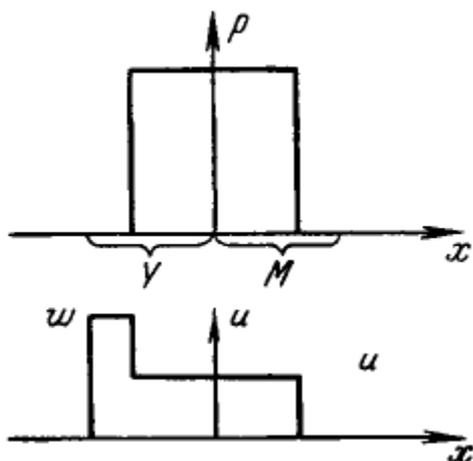


Рис.30. Профили давления и скорости после удара в методе торможения.

Методом торможения в работе [1] была снята ударная адиабата железа вплоть до давлений  $p \sim 5 \cdot 10^6$  атм. ( $D \sim 12$  км/сек, и  $\sim 5$  км/сек,  $V_0/V \sim 1,75$ ). Было исследовано также пористое железо с плотностью в 1,4 раза меньшей нормальной.

Метод торможения можно перенести и на тот случай, когда исследуемая мишень и ударник сделаны из разных материалов, однако при этом в качестве ударника необходимо брать вещество с известной ударной адиабатой. В ряде случаев это оказывается более целесообразным, чем делать ударник из исследуемого материала, так как путем соответствующего выбора вещества ударника можно от одного и того же заряда ВВ получить в исследуемом веществе более мощную ударную волну.

Если материалы ударника и мишени различны, то, несмотря на равенство давлений в обеих ударных волнах, скачки скоростей уже не одинаковы, так что  $w - u \neq u$ .

Однако если ударная адиабата ударника известна, то известна зависимость давления от скачка массовой скорости, т. е. функция  $p = f(w - u)$ . С другой стороны, давление  $p$  связано со скачком массовой скорости в мишени, равным скорости контактной границы  $u$ , формулой (9):  $p = D_0 u / V_0$ .

Измеряя, как и раньше, скорость ударной волны в мишени и скорость ударника  $w$ , можно найти скорость  $u$  из уравнения

$$f(w - u) = \frac{Du}{V_0} . \quad (12)$$

Для этой цели очень удобен графический метод, основанный на использовании диаграммы давление — скорость (см. § 24, гл. I). Эти диаграммы широко применяют при рассмотрении различных процессов с ударными волнами, в которых участвуют две соприкасающиеся среды, так как на контактной границе между средами давления и скорости одинаковы.

Рассмотрим столкновение ударника и мишени с помощью диаграммы  $p, u$ , где  $u$  — массовая скорость вещества в лабораторной системе координат, в данном случае в системе, в которой мишень вначале покоится. На рис. 30 начальные состояния мишени ( $p = 0, u = 0$ ) и летящего ударника  $p = 0, u = w$  изображаются точками  $O$  и  $A$ .

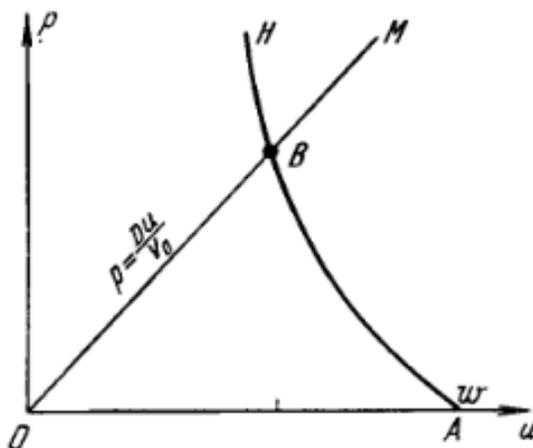


Рис.31.  $p, u$ -диаграмма для опыта с торможением: НВА -ударная адиабата ударника; ОВМ - геометрическое место состояний мишени после удара.

Если измеренная скорость ударной волны на мишени есть  $D$ , то геометрическим

местом состояния вещества мишени в ударной волне служит прямая  $p = \frac{D u}{V_0}$  с известным наклоном  $D/V_0$ . Изобразим ударную адиабату вещества ударника, имея в виду зависимость давления не от объема, а от скачка скорости, равного в данном случае  $w - u$ :  $p = f(w - u)$ . Точка пересечения В обеих линий согласно уравнению (12) и определяет состояние (давление и массовую скорость) в обеих ударных волнах. Если ударник и мишень сделаны из одного материала, то, как мы уже знаем, точка пересечения лежит как раз посередине между абсциссами точек О и А ( $u = w/2$ ).

3. Метод «отражения». В этом методе используются закономерности, которым подчиняется процесс распада произвольного разрыва, возникающего при отражении ударной волны от границы двух сред (см. § 24 гл. I). Он обладает тем преимуществом по сравнению с предыдущими, что не нуждается в измерении массовых скоростей, которое в экспериментальном отношении гораздо сложнее, чем измерение скорости фронта ударной волны. Однако для этого метода необходимо иметь эталонное вещество с известным уравнением состояния. Метод был разработан авторами работы [2] совместно с Г. М. Гандельманом.

Рассмотрим переход сильной ударной волны из среды А в среду В. По веществу В при этом всегда идет ударная волна, отраженная же волна в А может быть либо ударной, если вещество В «жестче», чем А, либо волной разрежения, если В «мягче», чем А (это проще всего себе представить, если рассмотреть такие предельные случаи: А — газ, В — твердое тело и А — твердое тело, В — газ).

Профили скоростей и давлений в обоих случаях изображены на рис. 11.24. Там же даны соответствующие диаграммы  $x, t$ .

Рассмотрим этот процесс с помощью диаграммы давление — скорость (в исходном состоянии оба вещества, А и В, покоятся в лабораторной системе координат).

Предположим, что уравнение состояния вещества А известно. Изобразим на  $p, u$ -диаграмме (рис. 31) ударную адиабату вещества А  $p_A(u)$  для первой ударной волны, распространяющейся по невозмущенному материалу. Если измерить на опыте скорость фронта начальной ударной волны  $D_1$ , то состояние в ней изобразится точкой а ( $p_a, u_a$ ) — точкой пересечения прямой  $p = D_1 u / V_{0A}$  с ударной адиабатой  $p_A(u)$ .

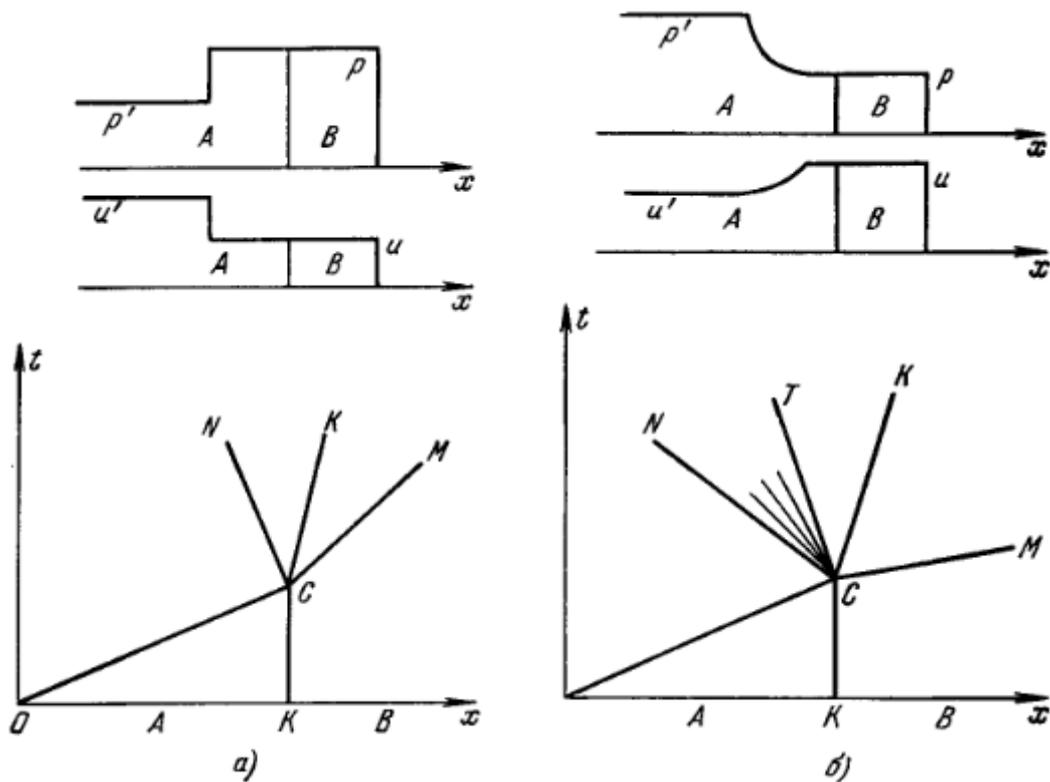
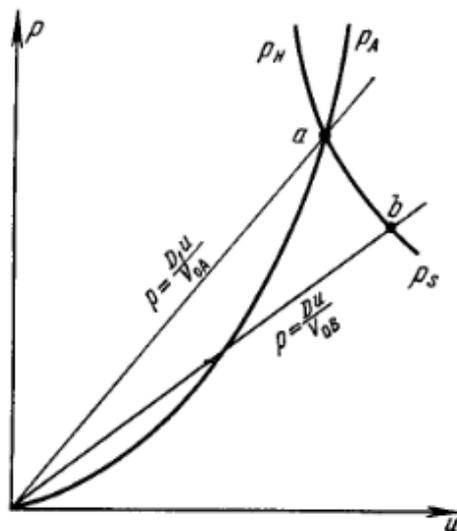


Рис.32. Профили давления и скорости и  $x, t$ -диаграмма для опыта с отражением.

а) Случай, когда отражённая волна - ударная. ОС - ударная волна в А; СМ - ударная волна в В; СN - отражённая ударная волна в А; КСК - линия контакта А и В. б) Случай, когда отражённая волна - волна разрежения. ОС - ударная волна в А; СМ - ударная волна в В; СN - голова волны разрежения; СТ - хвост волны разрежения; КСК - линия контакта А и В.

Рис.33.  $p, u$ -диаграмма для опыта с отражением.



После отражения этой ударной волны от границы между средами А и В в веществе А возникает новое состояние. Если отраженная волна ударная, то состояние лежит на ударной адиабате вторичного сжатия, для которой исходным является состояние а ( $p_a, V_a, u_a$ ); эта ударная адиабата изображается кривой  $p_n$ , выходящей вверх из точки а.

Если же отраженная волна — адиабатическая волна разрежения, то новое состояние лежит на изэнтропе разрежения, идущей из точки а вниз (кривая  $p_s$ ). Поскольку уравнение состояния вещества А предполагается известным, то как ударную адиабату вторичного сжатия  $p_n(V, V_a, p_a)$ , так и изэнтропу разрежения с энтропией, равной  $S_a = S(p_a, V_a)$ , можно преобразовать так, чтобы вместо объема в качестве аргумента вошла скорость. В

первом случае это делается путем использования соотношений на фронте ударной волны, во втором с помощью соотношений, справедливых для волны разрежения (см. § 10 гл. I).

Если измерить на опыте и скорость ударной волны  $D$  в среде  $B$ , то геометрическим местом состояний в этой волне служит прямая  $p = Du/V_{0B}$ . Точка пересечения  $b$  этой прямой с кривой  $p_{нар_s}$  — геометрическим местом возможных состояний в веществе  $A$  после отражения ударной волны — и определяет давление и скорость в ударной волне в  $B$ , равные давлению и скорости контактной границы  $A$  и  $B$  (см. рис. 32).

На диаграмме  $p, u$  рис. 33 изображен второй случай, когда при отражении возникает волна разрежения. В первом случае прямая  $p = Du/V_{0B}$  проходит выше прямой  $p = D_1u/V_{0A}$  и точка пересечения  $b$  лежит выше точки  $a$  на ударной адиабате вторичного сжатия вещества  $A$ , которая описывается кривой  $a_{рн}$ .

Итак, методика «отражения» состоит в следующем. В пластине из материала  $A$  известным уравнением состояния создается ударная волна либо непосредственно от заряда  $BB$ , либо путем удара другой пластины, предварительно разогнанной  $BB$  до большой скорости. Эта волна выходит в образцы исследуемых материалов  $B$ , среди которых в том числе имеется и образец из материала  $A$  (схема опыта показана на рис. 34).

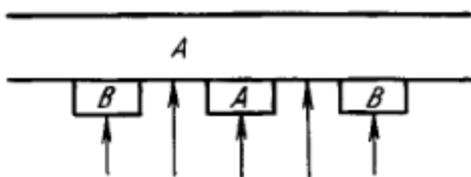


Рис.34. Схема опыта с отражением.

Регистрируя моменты замыкания электроконтактных датчиков, расположенных в местах, указанных на рис. 34 стрелками, определяют скорости фронта  $D_1$  и  $D$ . Построив ударную адиабату  $p_A(u)$  на  $p, u$ -диаграмме и проведя прямую  $p = D_1u/V_{0A}$ , находят точку  $a$  — состояние в ударной волне в  $A$ . Затем проводят через точку  $a$  вверх ударную адиабату вторичного сжатия, а вниз — обычную адиабату и наносят прямую  $p = Du/V_{0B}$ , тем самым определяя искомое состояние  $b$  ( $p, u$ ) в ударной волне в исследуемом образце.

Фактически (на опыте) изменения давления между состояниями  $a$  и  $b$  всегда были небольшими. В этих условиях, как показали расчеты, кривая  $p_{нар_s}$  с большой точностью может быть представлена как зеркальное отображение ударной адиабаты первичного сжатия в точке  $a$ . Заметим, что наклон кривой  $p_{нар_s}$  в точке  $a$  определяется скоростью звука за фронтом первичной ударной волны в  $A$ . В самом деле, в волне разрежения, так же как и в слабой волне сжатия  $dp = \pm \rho c du$  (см. формулу (1.59)), т. е. наклон кривой  $p_{нар_s}$  в точке  $a$  есть  $\left| \frac{dp}{du} \right| = \rho c = \frac{c}{V}$ , где  $c$  и  $V$  — скорость звука и объем в веществе  $A$ , сжатом первой ударной волной. Методы экспериментального определения скорости звука за фронтом ударной волны будут рассмотрены ниже.

Методом отражения в работе И. В. Альтшулера, К. К. Крупникова и М. И. Бражник [2] были сняты ударные адиабаты целого ряда металлов (Cu, Zn, Pb и др.). Метод был использован для изучения сжимаемости хлористого натрия в работе [3], а также

применялся в большинстве работ зарубежных ученых. Чаще всего в качестве материалов экрана А использовались железо, алюминий или латунь.

#### 4.5. Расчет начальных параметров ударной волны

Для удобства и простоты моделирования и дальнейшего анализа необходимо иметь начальные параметры фронта ударной волны при высокоскоростном взаимодействии осколка с преградой в различных диапазонах скоростей, для различных материалов. В данной работе рассчитываются основные начальные параметры ударных волн в металлических преградах.

При возникновении ударной волны справедливы законы сохранения массы, импульса и энергии. Так как давление, действующее на материал преграды и осколок в результате столкновения одинаковое, то можно записать тождество  $P_{\text{в ударнике}} = P_{\text{в преграде}}$ .  
Давление

$$P = \rho U D, \quad (13)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $U$  – массовая скорость вещества,  $D$  – скорость распространения ударной волны.

Поэтому тождество  $P_{\text{в ударнике}} = P_{\text{в преграде}}$  можно записать как

$$\rho_1 U_1 D_1 = \rho_2 U_2 D_2, \quad (14)$$

где  $\rho_1$  – плотность материала ударника (осколка),  $\rho_2$  – плотность материала преграды,  $U_1$  – массовая скорость вещества ударника,  $U_2$  – массовая скорость вещества в преграде,  $D_1$  – скорость распространения ударной волны в ударнике,  $D_2$  – скорость распространения ударной волны в преграде.

$$D = C_0 + \lambda U, \quad (15)$$

где коэффициенты  $C_0$ ,  $\lambda$  зависят от материалов преграды и ударника и рассчитываются для каждого металла отдельно.

Подставляем (15) в (14) и получаем

$$C_{01} \rho_1 U_1 + \lambda_1 \rho_1 U_1^2 = C_{02} \rho_2 U_2 + \lambda_2 \rho_2 U_2^2. \quad (16)$$

При столкновении разноименных (разноплотных) металлов скорость ударника

$$V = U_1 + U_2. \quad (17)$$

Выражаем одну из неизвестных переменных  $U_1$  или  $U_2$  из уравнения (14) и подставляем в квадратное уравнение (16), упрощаем и с помощью программы Excel найдем общее решение квадратного уравнения.

При столкновении одноименных (одноплотных) металлов процесс нахождения начальных параметров ударных волн намного проще, так как массовая скорость вещества ударника равна массовой скорости вещества в преграде  $U_1 = U_2$  и, следовательно,  $V = 2U$ ,  $U = V/2$ .

В данной работе по вышеизложенной методике был произведен расчет начальных параметров ударных волн при соударении осколка и преграды из различных материалов, использующихся для обшивки космической техники, в диапазоне скоростей от 1 до 15 км/с. Ранее такие расчёты были проведены только до скоростей 10 км/с. В качестве материалов осколка и преграды были использованы следующие металлы: титан, сталь, медь, свинец, дюралюминий, магний, никель. Для таких материалов как титан, магний и никель расчёты в

диапазоне скоростей 1 – 15 км/с проведены впервые. Данные расчета начальных параметров ударных волн при столкновении одноплотных металлов приведены в таблицах приложения А, при столкновении разноплотных металлов – в таблице приложения Б, и образуют базу данных этих параметров для ряда металлов. Эти значения можно использовать в качестве исходных данных для моделирования дальнейшего процесса распространения ударных волн и для тестовых расчетов.

## **5. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И СУЩЕСТВОВАНИЕ ЧЕЛОВЕКА В ТЕХНОСФЕРЕ**

Научные и технические исследования ударных волн, образующихся в космическом пространстве и на Земле, могут быть весьма привлекательными, плодотворными и продуктивными. К сожалению, вместе с тем они создают опасные для жизни человека последствия, связанные с использованием огнестрельного оружия, химических взрывчатых веществ и ядерного оружия в масштабах, начиная от трагедии отдельной личности и кончая возможной мировой катастрофой для миллионов людей. Будем надеяться, что осознание этого в конце концов положит конец агрессии и войнам и приведет к созданию мирного и созидательного сообщества людей Земли.

### **5.1. Ударные волны и сохранение жизни на Земле**

Преыдущее рассмотрение ударных волн в космосе и на Земле позволило выявить их распространенность. Только сейчас мы начинаем понимать их космическую роль. Сомнительно, чтобы жизнь на Земле была возможна, если бы создаваемые в процессе ядерных реакций ударные волны не поддерживали работу солнечного реактора. Мы до сих пор до конца не можем понять истинного значения взрывающихся звезд и галактик в общей картине мироздания и их роли в заполнении огромных пространств! разреженной плазмой и электромагнитными полями. Даже наша Солнечная система, возможно, обязана своим существованием подобному космическому взрыву, когда ударная волна разбросала! элементы, из которых впоследствии образовалась наша Земля и в конечном счете все многообразные формы жизни, развившиеся на ней. На Земле человек находится во власти ударных волн и связанных с ними потенциально опасных явлений, вызванных грозами, землетрясениями, извержениями вулканов, падением! метеороидов, взрывами в шахтах и других местах. Они уже унесли бесчисленное множество жизней и, безусловно, в будущем будут продолжать собирать свою дань. Потери уменьшатся, когда мы научимся заранее распознавать, контролировать и измерят возможные предупредительные сигналы надвигающихся катастроф (волны давления, распределения температуры, концентрацию газа, напряжения земной коры и т. п.). Тогда можно будет принять необходимые меры для спасения жизни людей и сведения к минимуму материальных убытков. В Японии, например, строительство сейсмостойких зданий и четкая организация военных и гражданских спасательных служб явились первым вкладом в дело предупреждения катастроф. Фотографии надвигающихся ураганов, полученные со спутников, уже помогли спасти тысячи человеческих жизней во Флориде, послужив предупреждением, позволившим организовать своевременную эвакуацию людей. В будущем, возможно, будут

разработаны методы аналогичного заблаговременного предсказания землетрясений и извержений вулканов. К счастью, падение метеороидов не такое частое явление, чтобы расцениваться как большая опасность, но всегда существует вероятность крупного бедствия. (Представьте себе последствия взрыва Тунгусского метеороида над населенным районом). Взрывы на шахтах и в других местах можно свести к минимуму благодаря более тщательному соблюдению правил техники безопасности.

Однако по числу человеческих жертв эти естественные причины не идут ни в какое сравнение с бессмысленными бойнями, происходящими периодически с самого начала нашего существования, в которых гибнут как участники, так и мирное население, особенно с войнами и концентрационными лагерями последнего времени. По общему признанию, изобретение химических взрывчатых веществ, а затем ядерного оружия привело к многократному увеличению убойной силы оружия. Однако это только одна сторона медали, даже если отвлечься от огромных возможностей мирного применения химических и ядерных взрывчатых веществ. Действительно, изобретение ядерного (а также биологического и химического) оружия, сделав возможным уничтожение всего человечества, на какое-то время удержало сверхдержавы от войн. Они отдают себе отчет в том, что применение этого оружия привело бы к массовому самоубийству и, возможно, положило бы конец существованию высших форм жизни на Земле. И все же мы не можем жить в неопределенности под этой постоянной угрозой уничтожения, и в конце концов все, атомное, биологическое и химическое оружие должно быть демонтировано, его смертоносные заряды обезврежены или использованы в мирных целях. Мы должны покончить с войнами, если хотим выжить на этой планете. Важно помнить, что, в то время когда изобреталось и совершенствовалось современное оружие массового уничтожения, самые чудовищные и отвратительные массовые убийства за всю историю человечества были совершены в лагерях смерти наиболее развитой нацией без применения каких-либо взрывчатых веществ.

Даже среди так называемых развивающихся наций такое примитивное орудие цивилизации, как нож, за последние несколько десятилетий унесло немало жизней.

Такие жестокие истребления, вдохновляемые бредовыми идеями и зажигательными речами, дегуманизируют человечество и провоцируют разрушительные действия. Ликвидация беспричинной ненависти путем развития системы образования и совершенствования законов является такой же насущной необходимостью, как отказ от насилия и войн. Поэтому искусство и наука в равной мере несут общую ответственность за поддержание уникальной жизни на космическом корабле «Земля», ибо сомнительно, что среди мириад планет в космосе мы когда-либо найдем копию нашего мира.

## **5.2. Ударные волны и человек**

Изучение ударных волн было начато в середине XIX в. группой математиков, занимавшихся прикладными проблемами, и экспериментаторов (Стоке, Эрншоу, Риман, Рэнкин, Гюгиони, Вьелль, Чепмен, Жуге и др.). В период между второй мировой войной и вплоть до настоящего времени потребовались новые и точные

данные относительно взрывных волн, образующихся при химических и ядерных взрывах, и ударных волн, возникающих при возвращении ракет в плотные слои атмосферы и при сверхзвуковых полетах. Эта потребность дала новый стимул многочисленным исследованиям выдающихся ученых (Тейлор, Нейман, Седов, Бете, Теллер, Блекни, Лапорт, Кантровиц, Патерсон и др.). Была опубликована обширная литература, содержащая значительную информацию, накопленную в этой области за последние несколько десятилетий.

А теперь давайте подумаем. Можем ли мы сказать, что на основании тысячелетних наблюдений и бесчисленных письменных свидетельств мы так же много знаем о самом человеке? В конце концов только во власти индивидуума решить, как будет использован нож: для поддержания или для лишения жизни. Множество возвышенных и вдохновенных религиозных, философских, экономических и политических систем, утопических идей и цивилизаций было выдвинуто или развито, чтобы помочь человеку поднять свой духовный и материальный уровень. Безусловно, они оказывали на него временами положительное, временами отрицательное влияние. Однако в лучшем случае они привели лишь к незначительному успеху, если сравнивать кровавое историческое прошлое человека с его нынешним ненадежным положением и сомнительным качеством его жизни. Не объясняются ли наши ограниченные успехи в возвышении и цивилизации человеческого рода тем, что мы описывали человека (и предписывали ему быть) таким, каким нам *хотелось его видеть*, а не таким, каков он *есть на самом деле*! (Или, как недавно выразил эту мысль Дэниис Габор: «Я *верю* в способность человека к совершенствованию, потому что это единственная рабочая гипотеза для каждого, кто не лишен моральных принципов и чувства ответственности. Но я *знаю* о почти безграничной испорченности человека».) Так каков же он?



Рис. 35. Взрыв Сверхновой, 12.Об.96

### **Литература**

1. Фортов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. Научная лекция при вручении большой Международной золотой медали им. А. Эйнштейна по физике. М.: Изд-во «БУКОС», 2005, - 91 с.
2. Гласс И.И. Ударные волны и человек. Изд-во «Мир», Москва, 1977, 191 с.
3. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. - Москва — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004.- 188 стр.

## Приложение А (обязательное) Ударные адиабаты веществ

Материал	с1, км/с	с2, км/с	с3, км/с	с0, км/с	S
Бериллий	13,18	8,98	8,14	7,998	1,124
Магний	5,74	3,15	4,44	4,492	1,263
Магний легированный (сплав AZ-31B)	5,73	3,05	4,52	4,522	1,242
Титан	-	-	-	5,220	0,767
Цирконий	4,77	2,39	3,89	3,757	1,018
Гафний	3,86	2,12	2,98	2,954	1,121
Ванадий	-	-	-	5,077	1,201
Ниобий	5,03	2,11	4,39	4,438	1,207
Тантал	4,15	2,07	3,39	3,414	1,200
Хром	6,60	4,32	4,32	5,173	1,473
Молибден	6,45	3,47	5,04	5,124	1,233
Вольфрам	5,22	2,89	4,02	4,029	1,237
Рений	5,33	2,89	4,16	4,184	1,367
Родий	-	-	-	4,807	1,376
Палладий	4,57	2,06	3,90	3,948	1,588
Иридий	-	-	-	3,916	1,457
Платина	4,08	1,79	3,51	3,598	1,544
Карбид кремния	11,73	7,43	8,00	8,000	0,950
Карбид вольфрама	6,89	4,18	4,92	4,920	1,339
Нержавеющая сталь 304	5,77	3,12	4,51	4,569	1,490
Нержавеющая сталь 304L	5,79	3,16	4,49	4,569	1,490
Неопрен	-	-	-	2,785	1,419
Адипрен	-	-	-	2,332	1,536
Полиуретанопласт	2,39	1,03	2,07	2,486	1,577
Полиэтилен	2,04	0,66	1,90	2,901	1,481
Полистирол	-	-	-	2,746	1,319
Люсит	2,69	1,38	2,17	2,260	1,816
Плексиглас	2,72	1,40	2,19	2,572	1,536
Парафин	-	-	-	2,960	1,531
Эпоксидная смола	2,87	1,48	2,30	2,678	1,520
Эксон	-	-	-	1,952	1,660
Дюрит	-	-	-	2,847	1,404
Феноксосомола	2,51	1,07	2,18	2,266	1,698
Рефрасил	-	-	-	3,016	1,005
Эпоксидная смола (Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ·5H <sub>2</sub> O)	4,40	2,67	3,14	4,052	1,486
Пирекс	5,55	3,45	3,88	-	-
Мелмак	-	-	-	3,505	1,213
Тефлон	-	-	-	1,682	1,819
Гетинакс	2,67	1,50	2,03	3,048	1,422
Селектрон	-	-	-	2,722	1,333
Золото	-	-	-	3,075	1,560

Материал	cl, км/с	ct, км/с	cb, км/с	co, км/с	S
Бериллий	13,18	8,98	8,14	7,998	1,124
Магний	5,74	3,15	4,44	4,492	1,263
Магний легированный (сплав AZ-31B)	5,73	3,05	4,52	4,522	1,242
Титан	-	-	-	5,220	0,767
Цирконий	4,77	2,39	3,89	3,757	1,018
Гафний	3,86	2,12	2,98	2,954	1,121
Ванадий	-	-	-	5,077	1,201
Ниобий	5,03	2,11	4,39	4,438	1,207
Тантал	4,15	2,07	3,39	3,414	1,200
Хром	6,60	4,32	4,32	5,173	1,473
Молибден	6,45	3,47	5,04	5,124	1,233
Вольфрам	5,22	2,89	4,02	4,029	1,237
Рений	5,33	2,89	4,16	4,184	1,367
Родий	-	-	-	4,807	1,376
Палладий	4,57	2,06	3,90	3,948	1,588
Иридий	-	-	-	3,916	1,457
Платина	4,08	1,79	3,51	3,598	1,544
Карбид кремния	11,73	7,43	8,00	8,000	0,950
Карбид вольфрама	6,89	4,18	4,92	4,920	1,339
Нержавеющая сталь 304	5,77	3,12	4,51	4,569	1,490
Нержавеющая сталь 304L	5,79	3,16	4,49	4,569	1,490
Неопрен	-	-	-	2,785	1,419
Адипрен	-	-	-	2,332	1,536
Полиуретанопласт	2,39	1,03	2,07	2,486	1,577
Полиэтилен	2,04	0,66	1,90	2,901	1,481
Полистирол	-	-	-	2,746	1,319
Люсит	2,69	1,38	2,17	2,260	1,816
Плексиглас	2,72	1,40	2,19	2,572	1,536
Парафин	-	-	-	2,960	1,531
Эпоксидная смола	2,87	1,48	2,30	2,678	1,520
Эксон	-	-	-	1,952	1,660
Дюрит	-	-	-	2,847	1,404
Феноксосола	2,51	1,07	2,18	2,266	1,698
Рефрасил	-	-	-	3,016	1,005
Эпоксидная смола (Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·5H <sub>2</sub> O)	4,40	2,67	3,14	4,052	1,486
Пирекс	5,55	3,45	3,88	-	-
Мелмак	-	-	-	3,505	1,213
Тефлон	-	-	-	1,682	1,819
Гетинакс	2,67	1,50	2,03	3,048	1,422
Селектрон	-	-	-	2,722	1,333
Золото	-	-	-	3,075	1,560

## Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Начальные параметры ударных волн при столкновении  
одноплотных металлов: сталь, медь, дюралюминий, свинец.

V км/ с	Сталь – Сталь			Медь – Медь			Дюралюминий – Дюралюминий			Свинец – Свинец		
	U1, км/ с	D1, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа
1	0,5	4,590	17,90	0,5	4,630	20,74	0,5	6,010	8,14	0,5	2,93 5	16,64
1,5	0,7 5	4,985	29,16	0,75 0	4,995	33,57	0,75 0	6,350	12,91	0,75 0	3,25 3	27,65
2	1	5,380	41,96	1	5,360	48,03	1	6,690	18,13	1	3,57 0	40,47
2,5	1,2 5	5,775	56,31	1,25	5,725	64,12	1,25	7,030	23,81	1,25	3,88 8	55,09
3	1,5	6,170	72,19	1,5	6,090	81,85	1,5	7,370	29,96	1,5	4,20 5	71,50
3,5	1,7 5	6,565	89,61	1,75	6,455	101,2 1	1,75	7,710	36,56	1,75	4,52 3	89,72
4	2	6,960	108,5 8	2	6,820	122,2 1	2	8,050	43,63	2	4,84 0	109,7 3
4,5	2,2 5	7,355	129,0 8	2,25	7,185	144,8 5	2,25	8,390	51,16	2,25	5,15 8	131,5 5
5	2,5	7,750	151,1 3	2,5	7,550	169,1 2	2,5	8,730	59,15	2,5	5,47 5	155,1 6
5,5	2,7 5	8,145	174,7 1	2,75	7,915	195,0 3	2,75	9,070	67,59	2,75	5,79 3	180,5 8
6	3	8,540	199,8 4	3	8,280	222,5 7	3	9,410	76,50	3	6,11 0	207,7 9
6,5	3,2 5	8,935	226,5 0	3,25	8,645	251,7 4	3,25	9,750	85,87	3,25	6,42 8	236,8 0
7	3,5	9,330	254,7 1	3,5	9,010	282,5 5	3,5	10,09 0	95,70	3,5	6,74 5	267,6 1
7,5	3,7 5	9,725	284,4 6	3,75	9,375	315,0 0	3,75	10,43 0	105,9 9	3,75	7,06 3	300,2 3
8	4	10,12 0	315,7 4	4	9,740	349,0 8	4	10,77 0	116,7 5	4	7,38 0	334,6 4
8,5	4,2 5	10,51 5	348,5 7	4,25	10,10 5	384,8 0	4,25	11,11 0	127,9 6	4,25	7,69 8	370,8 5
9	4,5	10,91 0	382,9 4	4,5	10,47 0	422,1 5	4,5	11,45 0	139,6 3	4,5	8,01 5	408,8 6
9,5	4,7 5	11,30 5	418,8 5	4,75	10,83 5	461,1 4	4,75	11,79 0	151,7 7	4,75	8,33 3	448,6 7
10	5	11,70 0	456,3 0	5	11,20 0	501,7 6	5	12,13 0	164,3 6	5	8,65 0	490,2 8

Окончание таблицы Б.1

10,5	5,25	12,095	495,29	5,25	11,565	544,02	5,25	12,470	177,42	5,25	8,968	533,69
11	5,5	12,490	535,82	5,5	11,930	587,91	5,5	12,810	190,93	5,5	9,285	578,90
11,5	5,75	12,885	577,89	5,75	12,295	633,44	5,75	13,150	204,91	5,75	9,603	625,91
12	6	13,280	621,50	6	12,660	680,60	6	13,490	219,35	6	9,920	674,72
12,5	6,25	13,675	666,66	6,25	13,025	729,40	6,25	13,830	234,25	6,25	10,238	725,33
13	6,5	14,070	713,35	6,5	13,390	779,83	6,5	14,170	249,60	6,5	10,555	777,73
13,5	6,75	14,465	761,58	6,75	13,755	831,90	6,75	14,510	265,42	6,75	10,873	831,94
14	7	14,860	811,36	7	14,120	885,61	7	14,850	281,70	7	11,190	887,95
14,5	7,25	15,255	862,67	7,25	14,485	940,95	7,25	15,190	298,45	7,25	11,508	945,76
15	7,5	15,650	915,53	7,5	14,850	997,92	7,5	15,530	315,65	7,5	11,825	1005,36

Таблица Б.2 - Начальные параметры ударных волн при столкновении  
одноплотных металлов: титан, магний, никель.

V км/с	Титан – Титан			Магний – Магний			Никель – Никель		
	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа
1	0,5	5,410	12,19	0,5	5,160	4,49	0,5	5,310	23,66
1,5	0,75	5,695	19,24	0,75	5,470	7,14	0,75	5,715	38,19
2	1	5,980	26,94	1	5,780	10,06	1	6,120	54,53
2,5	1,25	6,265	35,28	1,25	6,090	13,25	1,25	6,525	72,67
3	1,5	6,550	44,26	1,5	6,400	16,70	1,5	6,930	92,62
3,5	1,75	6,835	53,89	1,75	6,710	20,43	1,75	7,335	114,37
4	2	7,120	64,15	2	7,020	24,43	2	7,740	137,93
4,5	2,25	7,405	75,06	2,25	7,330	28,70	2,25	8,145	163,29
5	2,5	7,690	86,61	2,5	7,640	33,23	2,5	8,550	190,45
5,5	2,75	7,975	98,80	2,75	7,950	38,04	2,75	8,955	219,42
6	3	8,260	111,63	3	8,260	43,12	3	9,360	250,19
6,5	3,25	8,545	125,11	3,25	8,570	48,46	3,25	9,765	282,77
7	3,5	8,830	139,23	3,5	8,880	54,08	3,5	10,170	317,15
7,5	3,75	9,115	153,99	3,75	9,190	59,96	3,75	10,575	353,34
8	4	9,400	169,39	4	9,500	66,12	4	10,980	391,33
8,5	4,25	9,685	185,43	4,25	9,810	72,54	4,25	11,385	431,12
9	4,5	9,970	202,12	4,5	10,120	79,24	4,5	11,790	472,72

## Окончание таблицы Б.2

9,5	4,75	10,255	219,44	4,75	10,430	86,20	4,75	12,195	516,12
10	5	10,540	237,41	5	10,740	93,44	5	12,600	561,33
10,5	5,25	10,825	256,02	5,25	11,050	100,94	5,25	13,005	608,34
11	5,5	11,110	275,28	5,5	11,360	108,72	5,5	13,410	657,16
11,5	5,75	11,395	295,17	5,75	11,670	116,76	5,75	13,815	707,78
12	6	11,680	315,71	6	11,980	125,07	6	14,220	760,20
12,5	6,25	11,965	336,89	6,25	12,290	133,65	6,25	14,625	814,43
13	6,5	12,250	358,71	6,5	12,600	142,51	6,5	15,030	870,46
13,5	6,75	12,535	381,17	6,75	12,910	151,63	6,75	15,435	928,30
14	7	12,820	404,28	7	13,220	161,02	7	15,840	987,94
14,5	7,25	13,105	428,03	7,25	13,530	170,68	7,25	16,245	1049,39
15	7,5	13,390	452,41	7,5	13,840	180,61	7,5	16,650	1112,64

### Приложение В (обязательное)

Таблица В.1 - Начальные параметры ударных волн при столкновении разноплотных металлов.

V км/с	Титан – Сталь					Титан – Медь				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,567	5,486	0,433	2,850	14,00	0,616	5,542	0,384	4,461	15,37
1,5	0,860	5,821	0,640	3,112	22,56	0,923	5,892	0,577	4,742	24,51
2	1,158	6,160	0,842	3,369	32,15	1,231	6,243	0,769	5,023	34,62
2,5	1,459	6,503	1,041	3,622	42,74	1,538	6,594	0,962	5,304	45,70
3	1,762	6,848	1,238	3,873	54,36	1,846	6,944	1,154	5,585	57,75
3,5	2,066	7,195	1,434	4,121	66,98	2,153	7,295	1,347	5,866	70,77
4	2,372	7,544	1,628	4,368	80,61	2,461	7,646	1,539	6,147	84,76
4,5	2,679	7,894	1,821	4,613	95,25	2,768	7,996	1,732	6,428	99,73
5	2,986	8,244	2,014	4,858	110,90	3,076	8,347	1,924	6,709	115,66
5,5	3,294	8,595	2,206	5,101	127,56	3,383	8,697	2,117	6,990	132,56
6	3,603	8,947	2,397	5,344	145,22	3,691	9,048	2,309	7,271	150,44
6,5	3,912	9,300	2,588	5,587	163,90	3,998	9,398	2,502	7,552	169,28
7	4,222	9,653	2,778	5,829	183,58	4,306	9,749	2,694	7,834	189,10
7,5	4,531	10,006	2,969	6,070	204,26	4,613	10,099	2,887	8,115	209,89
8	4,842	10,359	3,158	6,311	225,96	4,921	10,450	3,079	8,396	231,64
8,5	5,152	10,713	3,348	6,552	248,66	5,228	10,800	3,272	8,677	254,37
9	5,463	11,067	3,537	6,792	272,37	5,536	11,151	3,464	8,958	278,07
9,5	5,774	11,422	3,726	7,033	297,08	5,843	11,501	3,657	9,239	302,74
10	6,085	11,776	3,915	7,273	322,80	6,150	11,851	3,850	9,520	328,38
10,5	6,396	12,131	4,104	7,512	349,53	6,458	12,202	4,042	9,802	354,99
11	6,707	12,486	4,293	7,752	377,26	6,765	12,552	4,235	10,083	382,57
11,5	7,018	12,841	4,482	7,992	406,00	7,073	12,903	4,427	10,364	411,12
12	7,330	13,196	4,670	8,231	435,75	7,380	13,253	4,620	10,645	440,64
12,5	7,642	13,551	4,858	8,470	466,51	7,688	13,604	4,812	10,926	471,13
13	7,953	13,907	5,047	8,709	498,27	7,995	13,954	5,005	11,207	502,59

Продолжение таблицы В.1

13,5	8,265	14,262	5,235	8,948	531,03	8,302	14,305	5,198	11,489	535,03
14	8,577	14,618	5,423	9,187	564,81	8,610	14,655	5,390	11,770	568,43
14,5	8,889	14,973	5,611	9,426	599,59	8,917	15,006	5,583	12,051	602,81
15	9,201	15,329	5,799	9,665	635,38	9,225	15,356	5,775	12,332	638,15
	Титан – Свинец					Титан – Дюралюминий				
V км/с	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,567	5,486	0,433	2,850	14,00	0,410	5,307	0,590	6,132	9,80
1,5	0,860	5,821	0,640	3,112	22,56	0,621	5,548	0,879	6,525	15,53
2	1,158	6,160	0,842	3,369	32,15	0,836	5,793	1,164	6,913	21,81
2,5	1,459	6,503	1,041	3,622	42,74	1,052	6,040	1,448	7,299	28,63
3	1,762	6,848	1,238	3,873	54,36	1,271	6,289	1,729	7,682	36,00
3,5	2,066	7,195	1,434	4,121	66,98	1,491	6,539	2,009	8,063	43,91
4	2,372	7,544	1,628	4,368	80,61	1,711	6,791	2,289	8,442	52,36
4,5	2,679	7,894	1,821	4,613	95,25	1,933	7,044	2,567	8,821	61,35
5	2,986	8,244	2,014	4,858	110,90	2,156	7,298	2,844	9,198	70,89
5,5	3,294	8,595	2,206	5,101	127,56	2,380	7,553	3,120	9,574	80,96
6	3,603	8,947	2,397	5,344	145,22	2,603	7,808	3,397	9,949	91,58
6,5	3,912	9,300	2,588	5,587	163,90	2,828	8,064	3,672	10,324	102,73
7	4,222	9,653	2,778	5,829	183,58	3,053	8,320	3,947	10,698	114,43
7,5	4,531	10,006	2,969	6,070	204,26	3,278	8,577	4,222	11,072	126,67
8	4,842	10,359	3,158	6,311	225,96	3,504	8,834	4,496	11,445	139,45
8,5	5,152	10,713	3,348	6,552	248,66	3,730	9,092	4,770	11,818	152,77
9	5,463	11,067	3,537	6,792	272,37	3,956	9,350	5,044	12,190	166,63
9,5	5,774	11,422	3,726	7,033	297,08	4,182	9,608	5,318	12,562	181,03
10	6,085	11,776	3,915	7,273	322,80	4,409	9,866	5,591	12,934	195,97
10,5	6,396	12,131	4,104	7,512	349,53	4,636	10,125	5,864	13,305	211,45
11	6,707	12,486	4,293	7,752	377,26	4,863	10,384	6,137	13,677	227,47
11,5	7,018	12,841	4,482	7,992	406,00	5,090	10,642	6,410	14,048	244,03
12	7,330	13,196	4,670	8,231	435,75	5,317	10,902	6,683	14,419	261,13

Продолжение таблицы В.1

12,5	7,642	13,551	4,858	8,470	466,51	5,545	11,161	6,955	14,789	278,77
13	7,953	13,907	5,047	8,709	498,27	5,772	11,420	7,228	15,160	296,95
13,5	8,265	14,262	5,235	8,948	531,03	6,000	11,680	7,500	15,531	315,68
14	8,577	14,618	5,423	9,187	564,81	6,227	11,939	7,773	15,901	334,94
14,5	8,889	14,973	5,611	9,426	599,59	6,455	12,199	8,045	16,271	354,74
15	9,201	15,329	5,799	9,665	635,38	6,683	12,459	8,317	16,641	375,08
V км/с	Сталь – Свинец					Сталь – Медь				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,485	4,566	0,515	2,954	17,26	0,532	4,640	0,468	4,584	19,24
1,5	0,734	4,960	0,766	3,273	28,41	0,793	5,053	0,707	4,932	31,25
2	0,986	5,358	1,014	3,587	41,22	1,053	5,463	0,947	5,283	44,85
2,5	1,240	5,759	1,260	3,900	55,71	1,311	5,871	1,189	5,636	60,04
3	1,495	6,162	1,505	4,211	71,85	1,569	6,278	1,431	5,990	76,82
3,5	1,751	6,566	1,749	4,522	89,66	1,826	6,684	1,674	6,345	95,19
4	2,007	6,971	1,993	4,831	109,14	2,082	7,090	1,918	6,700	115,14
4,5	2,264	7,377	2,236	5,140	130,28	2,338	7,494	2,162	7,056	136,68
5	2,521	7,784	2,479	5,448	153,08	2,594	7,898	2,406	7,413	159,81
5,5	2,779	8,191	2,721	5,756	177,54	2,849	8,302	2,651	7,770	184,52
6	3,037	8,598	2,963	6,063	203,67	3,105	8,706	2,895	8,127	210,82
6,5	3,295	9,006	3,205	6,370	231,46	3,360	9,109	3,140	8,485	238,71
7	3,553	9,414	3,447	6,677	260,91	3,615	9,512	3,385	8,842	268,19
7,5	3,812	9,822	3,688	6,984	292,02	3,870	9,914	3,630	9,200	299,25
8	4,070	10,231	3,930	7,291	324,80	4,125	10,317	3,875	9,558	331,90
8,5	4,329	10,640	4,171	7,597	359,24	4,379	10,719	4,121	9,916	366,14
9	4,588	11,048	4,412	7,904	395,34	4,634	11,121	4,366	10,275	401,96
9,5	4,846	11,457	4,654	8,210	433,11	4,888	11,523	4,612	10,633	439,37
10	5,105	11,866	4,895	8,516	472,54	5,143	11,925	4,857	10,992	478,37
10,5	5,364	12,276	5,136	8,822	513,63	5,397	12,327	5,103	11,350	518,95
11	5,623	12,685	5,377	9,128	556,38	5,651	12,729	5,349	11,709	561,12

Продолжение таблицы В.1

11,5	5,882	13,094	5,618	9,434	600,79	5,906	13,131	5,594	12,068	604,88
12	6,142	13,504	5,858	9,740	646,87	6,160	13,533	5,840	12,426	650,23
12,5	6,401	13,913	6,099	10,046	694,61	6,414	13,934	6,086	12,785	697,16
13	6,660	14,323	6,340	10,352	744,01	6,668	14,336	6,332	13,144	745,68
13,5	6,919	14,732	6,581	10,658	795,08	6,923	14,738	6,577	13,503	795,78
14	7,178	15,142	6,822	10,963	847,81	7,177	15,139	6,823	13,862	847,47
14,5	7,438	15,551	7,062	11,269	902,20	7,431	15,541	7,069	14,221	900,75
15	7,697	15,961	7,303	11,575	958,25	7,685	15,942	7,315	14,580	955,62
V км/с	Сталь – Дюралюминий					Медь – Дюралюминий				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,334	4,327	0,666	6,236	11,26	0,304	4,344	0,696	6,276	11,84
1,5	0,504	4,596	0,996	6,685	18,05	0,462	4,575	1,038	6,741	18,96
2	0,675	4,866	1,325	7,132	25,61	0,623	4,810	1,377	7,202	26,87
2,5	0,847	5,138	1,653	7,578	33,95	0,786	5,048	1,714	7,660	35,57
3	1,020	5,411	1,980	8,023	43,05	0,951	5,289	2,049	8,117	45,07
3,5	1,193	5,686	2,307	8,467	52,93	1,117	5,531	2,383	8,571	55,35
4	1,367	5,960	2,633	8,910	63,57	1,284	5,774	2,716	9,024	66,42
4,5	1,542	6,236	2,958	9,353	74,99	1,452	6,019	3,048	9,476	78,28
5	1,716	6,512	3,284	9,796	87,17	1,620	6,265	3,380	9,927	90,93
5,5	1,891	6,788	3,609	10,238	100,13	1,789	6,512	3,711	10,377	104,37
6	2,066	7,065	3,934	10,680	113,86	1,958	6,759	4,042	10,827	118,59
6,5	2,241	7,341	4,259	11,122	128,35	2,128	7,007	4,372	11,276	133,60
7	2,417	7,619	4,583	11,563	143,62	2,298	7,255	4,702	11,725	149,39
7,5	2,592	7,896	4,908	12,004	159,66	2,469	7,504	5,031	12,173	165,98
8	2,768	8,173	5,232	12,446	176,46	2,639	7,753	5,361	12,621	183,35
8,5	2,944	8,451	5,556	12,887	194,04	2,810	8,003	5,690	13,068	201,50
9	3,119	8,729	5,881	13,327	212,39	2,981	8,253	6,019	13,515	220,45
9,5	3,295	9,007	6,205	13,768	231,51	3,153	8,503	6,347	13,963	240,18
10	3,471	9,285	6,529	14,209	251,40	3,324	8,753	6,676	14,409	260,69

Продолжение таблицы В.1

10,5	3,647	9,563	6,853	14,650	272,05	3,496	9,004	7,004	14,856	282,00
11	3,823	9,841	7,177	15,090	293,48	3,667	9,254	7,333	15,302	304,09
11,5	4,000	10,119	7,500	15,531	315,68	3,839	9,505	7,661	15,749	326,96
12	4,176	10,398	7,824	15,971	338,65	4,011	9,756	7,989	16,195	350,62
12,5	4,352	10,676	8,148	16,411	362,39	4,183	10,007	8,317	16,641	375,07
13	4,528	10,954	8,472	16,852	386,90	4,355	10,258	8,645	17,087	400,31
13,5	4,704	11,233	8,796	17,292	412,18	4,527	10,510	8,973	17,533	426,33
14	4,881	11,511	9,119	17,732	438,23	4,700	10,761	9,300	17,979	453,14
14,5	5,057	11,790	9,443	18,173	465,05	4,872	11,013	9,628	18,424	480,73
15	5,233	12,069	9,767	18,613	492,64	5,044	11,265	9,956	18,870	509,11
V км/с	Свинец – Дюралюминий					Магний – Сталь				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,351	2,746	0,649	6,213	10,93	0,772	5,498	0,228	4,160	7,39
1,5	0,524	2,965	0,976	6,658	17,61	1,149	5,965	0,351	4,355	11,92
2	0,696	3,184	1,304	7,104	25,11	1,521	6,426	0,479	4,556	17,01
2,5	0,867	3,401	1,633	7,551	33,42	1,890	6,884	0,610	4,763	22,65
3	1,037	3,618	1,963	7,999	42,54	2,257	7,339	0,743	4,974	28,82
3,5	1,208	3,834	2,292	8,448	52,48	2,622	7,791	0,878	5,188	35,54
4	1,377	4,049	2,623	8,897	63,23	2,985	8,241	1,015	5,404	42,80
4,5	1,547	4,265	2,953	9,346	74,79	3,346	8,689	1,154	5,623	50,60
5	1,716	4,480	3,284	9,796	87,17	3,707	9,137	1,293	5,843	58,93
5,5	1,886	4,695	3,614	10,246	100,35	4,067	9,583	1,433	6,065	67,81
6	2,055	4,910	3,945	10,696	114,35	4,426	10,028	1,574	6,288	77,22
6,5	2,224	5,124	4,276	11,146	129,17	4,784	10,472	1,716	6,512	87,17
7	2,393	5,339	4,607	11,596	144,79	5,142	10,915	1,858	6,736	97,65
7,5	2,561	5,553	4,939	12,047	161,23	5,499	11,358	2,001	6,962	108,68
8	2,730	5,767	5,270	12,497	178,48	5,856	11,801	2,144	7,188	120,24
8,5	2,899	5,981	5,601	12,948	196,54	6,212	12,243	2,288	7,415	132,33
9	3,067	6,195	5,933	13,399	215,42	6,568	12,684	2,432	7,642	144,97

Продолжение таблицы В.1

9,5	3,236	6,409	6,264	13,849	235,11	6,924	13,126	2,576	7,870	158,13
10	3,404	6,623	6,596	14,300	255,61	7,280	13,567	2,720	8,098	171,84
10,5	3,573	6,837	6,927	14,751	276,92	7,635	14,007	2,865	8,327	186,08
11	3,741	7,051	7,259	15,202	299,04	7,990	14,448	3,010	8,556	200,86
11,5	3,910	7,265	7,590	15,653	321,98	8,345	14,888	3,155	8,785	216,18
12	4,078	7,479	7,922	16,104	345,73	8,700	15,328	3,300	9,014	232,03
12,5	4,246	7,693	8,254	16,555	370,30	9,055	15,768	3,445	9,244	248,42
13	4,415	7,907	8,585	17,006	395,67	9,409	16,207	3,591	9,474	265,34
13,5	4,583	8,120	8,917	17,457	421,86	9,764	16,647	3,736	9,704	282,81
14	4,751	8,334	9,249	17,908	448,86	10,118	17,086	3,882	9,934	300,80
14,5	4,919	8,548	9,581	18,360	476,68	10,472	17,525	4,028	10,164	319,34
15	5,088	8,761	9,912	18,811	505,30	10,826	17,964	4,174	10,395	338,41
V км/с	Магний – Титан					Магний – Медь				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,712	5,422	0,288	5,169	6,71	0,796	5,527	0,204	4,197	7,66
1,5	1,055	5,848	0,445	5,348	10,73	1,183	6,008	0,317	4,362	12,37
2	1,391	6,265	0,609	5,534	15,17	1,565	6,481	0,435	4,534	17,65
2,5	1,724	6,677	0,776	5,725	20,03	1,943	6,950	0,557	4,713	23,50
3	2,052	7,084	0,948	5,921	25,29	2,318	7,415	0,682	4,895	29,91
3,5	2,377	7,487	1,123	6,120	30,97	2,690	7,876	0,810	5,082	36,87
4	2,699	7,887	1,301	6,323	37,05	3,060	8,335	0,940	5,272	44,38
4,5	3,020	8,284	1,480	6,528	43,53	3,429	8,792	1,071	5,464	52,45
5	3,338	8,679	1,662	6,734	50,41	3,796	9,246	1,204	5,659	61,07
5,5	3,655	9,072	1,845	6,943	57,70	4,161	9,700	1,339	5,855	70,23
6	3,971	9,464	2,029	7,153	65,39	4,526	10,152	1,474	6,052	79,95
6,5	4,285	9,854	2,215	7,365	73,48	4,889	10,603	1,611	6,251	90,21
7	4,599	10,243	2,401	7,577	81,96	5,252	11,053	1,748	6,451	101,02
7,5	4,912	10,630	2,588	7,791	90,85	5,615	11,502	1,885	6,652	112,37
8	5,223	11,017	2,777	8,005	100,13	5,976	11,951	2,024	6,854	124,28

Продолжение таблицы В.1

8,5	5,535	11,403	2,965	8,220	109,81	6,338	12,399	2,162	7,057	136,73
9	5,845	11,788	3,155	8,436	119,90	6,698	12,846	2,302	7,260	149,72
9,5	6,155	12,173	3,345	8,653	130,38	7,059	13,293	2,441	7,464	163,27
10	6,465	12,557	3,535	8,870	141,25	7,419	13,739	2,581	7,669	177,36
10,5	6,774	12,940	3,726	9,087	152,53	7,778	14,185	2,722	7,873	191,99
11	7,083	13,323	3,917	9,305	164,20	8,138	14,631	2,862	8,079	207,17
11,5	7,392	13,705	4,108	9,524	176,27	8,497	15,076	3,003	8,284	222,90
12	7,700	14,088	4,300	9,742	188,74	8,856	15,521	3,144	8,490	239,18
12,5	8,008	14,469	4,492	9,961	201,60	9,215	15,966	3,285	8,697	256,00
13	8,315	14,851	4,685	10,181	214,87	9,573	16,411	3,427	8,903	273,36
13,5	8,623	15,232	4,877	10,400	228,53	9,932	16,855	3,568	9,110	291,27
14	8,930	15,613	5,070	10,620	242,59	10,290	17,299	3,710	9,317	309,73
14,5	9,237	15,993	5,263	10,840	257,04	10,648	17,743	3,852	9,524	328,73
15	9,543	16,374	5,457	11,061	271,89	11,006	18,187	3,994	9,732	348,28
V км/с	Магний – Свинец					Магний – Дюралюминий				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,756	5,478	0,244	2,609	7,21	0,631	5,322	0,369	5,832	5,84
1,5	1,129	5,940	0,371	2,772	11,67	0,937	5,702	0,563	6,095	9,30
2	1,499	6,398	0,501	2,937	16,69	1,240	6,077	0,760	6,364	13,11
2,5	1,867	6,855	0,633	3,104	22,27	1,539	6,449	0,961	6,636	17,27
3	2,234	7,310	0,766	3,273	28,42	1,837	6,818	1,163	6,912	21,79
3,5	2,600	7,764	0,900	3,443	35,13	2,132	7,184	1,368	7,190	26,65
4	2,965	8,217	1,035	3,614	42,39	2,426	7,548	1,574	7,471	31,86
4,5	3,330	8,669	1,170	3,786	50,23	2,719	7,911	1,781	7,753	37,42
5	3,694	9,120	1,306	3,959	58,62	3,010	8,273	1,990	8,036	43,33
5,5	4,057	9,571	1,443	4,132	67,57	3,301	8,633	2,199	8,321	49,59
6	4,421	10,022	1,579	4,306	77,09	3,591	8,993	2,409	8,606	56,19
6,5	4,784	10,472	1,716	4,480	87,16	3,880	9,351	2,620	8,893	63,14
7	5,146	10,921	1,854	4,654	97,80	4,169	9,709	2,831	9,180	70,43

Продолжение таблицы В.1

7,5	5,509	11,371	1,991	4,829	108,99	4,457	10,067	3,043	9,468	78,07
8	5,871	11,820	2,129	5,004	120,75	4,745	10,424	3,255	9,757	86,06
8,5	6,233	12,269	2,267	5,179	133,07	5,033	10,780	3,467	10,046	94,40
9	6,595	12,718	2,405	5,354	145,95	5,320	11,136	3,680	10,335	103,08
9,5	6,957	13,167	2,543	5,529	159,39	5,607	11,492	3,893	10,625	112,11
10	7,319	13,615	2,681	5,705	173,39	5,893	11,847	4,107	10,915	121,48
10,5	7,681	14,064	2,819	5,881	187,95	6,179	12,203	4,321	11,206	131,21
11	8,042	14,512	2,958	6,056	203,07	6,466	12,557	4,534	11,497	141,27
11,5	8,404	14,961	3,096	6,232	218,76	6,752	12,912	4,748	11,788	151,69
12	8,765	15,409	3,235	6,408	235,00	7,037	13,266	4,963	12,079	162,45
12,5	9,126	15,857	3,374	6,584	251,81	7,323	13,621	5,177	12,371	173,55
13	9,488	16,305	3,512	6,761	269,17	7,609	13,975	5,391	12,662	185,01
13,5	9,849	16,753	3,651	6,937	287,10	7,894	14,328	5,606	12,954	196,81
14	10,210	17,201	3,790	7,113	305,58	8,179	14,682	5,821	13,246	208,95
14,5	10,571	17,649	3,929	7,289	324,63	8,464	15,036	6,036	13,539	221,45
15	10,933	18,096	4,067	7,466	344,24	8,749	15,389	6,251	13,831	234,28
V км/с	Магний – Никель					Никель – Сталь				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,816	5,551	0,184	4,799	7,88	0,440	5,213	0,560	4,684	20,45
1,5	1,212	6,043	0,288	4,967	12,74	0,668	5,582	0,832	5,115	33,21
2	1,603	6,527	0,397	5,143	18,20	0,898	5,955	1,102	5,541	47,64
2,5	1,989	7,007	0,511	5,328	24,25	1,130	6,331	1,370	5,965	63,74
3	2,372	7,481	0,628	5,517	30,88	1,364	6,709	1,636	6,386	81,51
3,5	2,752	7,952	0,748	5,712	38,08	1,598	7,089	1,902	6,805	100,95
4	3,129	8,420	0,871	5,910	45,85	1,834	7,470	2,166	7,223	122,05
4,5	3,505	8,886	0,995	6,112	54,19	2,070	7,853	2,430	7,640	144,82
5	3,879	9,350	1,121	6,316	63,10	2,306	8,236	2,694	8,056	169,26
5,5	4,251	9,812	1,249	6,523	72,58	2,543	8,620	2,957	8,471	195,36
6	4,623	10,272	1,377	6,732	82,62	2,781	9,005	3,219	8,886	223,12

Продолжение таблицы В.1

6,5	4,993	10,731	1,507	6,942	93,22	3,019	9,390	3,481	9,301	252,56
7	5,362	11,189	1,638	7,153	104,39	3,257	9,776	3,743	9,715	283,65
7,5	5,731	11,646	1,769	7,366	116,13	3,495	10,162	4,005	10,128	316,41
8	6,099	12,102	1,901	7,580	128,42	3,733	10,548	4,267	10,542	350,84
8,5	6,466	12,558	2,034	7,795	141,28	3,972	10,934	4,528	10,955	386,93
9	6,833	13,012	2,167	8,011	154,70	4,210	11,321	4,790	11,368	424,69
9,5	7,199	13,467	2,301	8,228	168,69	4,449	11,708	5,051	11,780	464,11
10	7,565	13,920	2,435	8,445	183,23	4,688	12,095	5,312	12,193	505,19
10,5	7,930	14,374	2,570	8,663	198,34	4,927	12,482	5,573	12,605	547,94
11	8,296	14,826	2,704	8,881	214,01	5,166	12,869	5,834	13,018	592,36
11,5	8,660	15,279	2,840	9,100	230,24	5,405	13,256	6,095	13,430	638,44
12	9,025	15,731	2,975	9,319	247,03	5,644	13,644	6,356	13,842	686,18
12,5	9,389	16,183	3,111	9,539	264,39	5,884	14,032	6,616	14,254	735,59
13	9,753	16,634	3,247	9,759	282,30	6,123	14,419	6,877	14,666	786,67
13,5	10,117	17,086	3,383	9,980	300,78	6,362	14,807	7,138	15,077	839,40
14	10,481	17,537	3,519	10,201	319,82	6,602	15,195	7,398	15,489	893,81
14,5	10,845	17,987	3,655	10,422	339,42	6,841	15,583	7,659	15,901	949,87
15	11,208	18,438	3,792	10,643	359,58	7,081	15,971	7,919	16,312	1007,61
V км/с	Никель – Титан					Никель – Медь				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,357	5,078	0,643	5,573	16,15	0,472	5,264	0,528	4,671	22,12
1,5	0,538	5,371	0,962	5,937	25,74	0,710	5,651	0,790	5,053	35,76
2	0,720	5,666	1,280	6,300	36,33	0,950	6,039	1,050	5,433	51,12
2,5	0,902	5,962	1,598	6,661	47,94	1,191	6,429	1,309	5,812	68,19
3	1,086	6,259	1,914	7,022	60,55	1,432	6,819	1,568	6,190	86,98
3,5	1,270	6,557	2,230	7,383	74,18	1,673	7,211	1,827	6,567	107,49
4	1,454	6,855	2,546	7,743	88,81	1,915	7,602	2,085	6,944	129,72
4,5	1,638	7,154	2,862	8,102	104,45	2,157	7,995	2,343	7,320	153,67
5	1,823	7,454	3,177	8,461	121,09	2,400	8,387	2,600	7,697	179,33

## Продолжение таблицы В.1

5,5	2,008	7,754	3,492	8,820	138,74	2,642	8,780	2,858	8,072	206,70
6	2,194	8,054	3,806	9,179	157,41	2,885	9,174	3,115	8,448	235,80
6,5	2,379	8,354	4,121	9,538	177,07	3,128	9,567	3,372	8,824	266,61
7	2,564	8,654	4,436	9,896	197,75	3,371	9,960	3,629	9,199	299,14
7,5	2,750	8,955	4,750	10,255	219,44	3,614	10,354	3,886	9,574	333,38
8	2,936	9,256	5,064	10,613	242,13	3,857	10,748	4,143	9,949	369,34
8,5	3,122	9,557	5,378	10,971	265,83	4,100	11,142	4,400	10,324	407,02
9	3,308	9,858	5,692	11,329	290,53	4,343	11,536	4,657	10,699	446,42
9,5	3,494	10,160	6,006	11,687	316,25	4,586	11,930	4,914	11,074	487,53
10	3,680	10,461	6,320	12,045	342,97	4,830	12,324	5,170	11,449	530,35
10,5	3,866	10,762	6,634	12,403	370,70	5,073	12,719	5,427	11,823	574,90
11	4,052	11,064	6,948	12,761	399,43	5,317	13,113	5,683	12,198	621,16
11,5	4,238	11,366	7,262	13,119	429,18	5,560	13,507	5,940	12,572	669,14
12	4,424	11,667	7,576	13,476	459,93	5,803	13,902	6,197	12,947	718,83
12,5	4,611	11,969	7,889	13,834	491,69	6,047	14,296	6,453	13,321	770,24
13	4,797	12,271	8,203	14,192	524,45	6,290	14,691	6,710	13,696	823,37
13,5	4,983	12,573	8,517	14,549	558,23	6,534	15,085	6,966	14,070	878,21
14	5,170	12,875	8,830	14,907	593,01	6,778	15,480	7,222	14,445	934,78
14,5	5,356	13,177	9,144	15,264	628,80	7,021	15,874	7,479	14,819	993,05
15	5,542	13,479	9,458	15,622	665,60	7,265	16,269	7,735	15,194	1053,05
V км/с	Никель – Свинец					Никель – Дюралюминий				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,426	5,190	0,574	3,029	19,71	0,279	4,952	0,721	6,310	12,32
1,5	0,654	5,559	0,846	3,375	32,38	0,427	5,192	1,073	6,789	19,75
2	0,886	5,936	1,114	3,714	46,88	0,578	5,436	1,422	7,264	27,99
2,5	1,123	6,319	1,377	4,049	63,21	0,732	5,685	1,768	7,735	37,07
3	1,362	6,706	1,638	4,381	81,36	0,888	5,938	2,112	8,203	46,96
3,5	1,602	7,096	1,898	4,710	101,31	1,045	6,193	2,455	8,669	57,67
4	1,845	7,488	2,155	5,037	123,08	1,204	6,450	2,796	9,133	69,20

Продолжение таблицы В.1

4,5	2,088	7,883	2,412	5,363	146,65	1,364	6,710	3,136	9,595	81,54
5	2,332	8,278	2,668	5,688	172,02	1,525	6,970	3,475	10,056	94,70
5,5	2,577	8,675	2,923	6,012	199,20	1,687	7,232	3,813	10,516	108,68
6	2,823	9,073	3,177	6,335	228,18	1,849	7,495	4,151	10,976	123,47
6,5	3,069	9,471	3,431	6,658	258,97	2,012	7,759	4,488	11,434	139,08
7	3,315	9,871	3,685	6,980	291,56	2,175	8,024	4,825	11,892	155,49
7,5	3,562	10,270	3,938	7,301	325,95	2,339	8,289	5,161	12,349	172,73
8	3,809	10,671	4,191	7,623	362,14	2,503	8,555	5,497	12,806	190,77
8,5	4,056	11,071	4,444	7,943	400,14	2,667	8,821	5,833	13,262	209,64
9	4,304	11,472	4,696	8,264	439,94	2,832	9,088	6,168	13,719	229,31
9,5	4,552	11,874	4,948	8,584	481,54	2,997	9,355	6,503	14,174	249,80
10	4,800	12,275	5,200	8,905	524,94	3,162	9,622	6,838	14,630	271,10
10,5	5,048	12,677	5,452	9,225	570,15	3,327	9,890	7,173	15,085	293,22
11	5,296	13,079	5,704	9,544	617,16	3,493	10,158	7,507	15,540	316,15
11,5	5,544	13,482	5,956	9,864	665,97	3,659	10,427	7,841	15,994	339,89
12	5,793	13,884	6,207	10,183	716,58	3,824	10,695	8,176	16,449	364,44
12,5	6,041	14,287	6,459	10,503	768,99	3,990	10,964	8,510	16,903	389,81
13	6,290	14,689	6,710	10,822	823,21	4,156	11,233	8,844	17,357	416,00
13,5	6,538	15,092	6,962	11,141	879,23	4,322	11,502	9,178	17,811	442,99
14	6,787	15,495	7,213	11,460	937,05	4,489	11,772	9,511	18,265	470,80
14,5	7,036	15,898	7,464	11,779	996,67	4,655	12,041	9,845	18,719	499,42
15	7,285	16,301	7,715	12,098	1058,10	4,821	12,311	10,179	19,173	528,86
V										
V км/с	Медь – Свинец									
	U1, км/с		D1, км/с		U2, км/с		D2, км/с		P, ГПа	
1	0,454		4,562		0,546		2,994		18,54	
1,5	0,692		4,911		0,808		3,326		30,46	
2	0,935		5,265		1,065		3,653		44,10	
2,5	1,180		5,623		1,320		3,976		59,48	
3	1,428		5,985		1,572		4,297		76,57	

## Окончание таблицы В.1

3,5	1,677	6,348	1,823	4,615	95,38
4	1,927	6,713	2,073	4,933	115,91
4,5	2,178	7,080	2,322	5,249	138,16
5	2,430	7,447	2,570	5,564	162,13
5,5	2,682	7,816	2,818	5,879	187,81
6	2,935	8,185	3,065	6,193	215,20
6,5	3,188	8,554	3,312	6,507	244,32
7	3,441	8,924	3,559	6,820	275,14
7,5	3,695	9,294	3,805	7,133	307,68
8	3,949	9,665	4,051	7,445	341,94
8,5	4,203	10,036	4,297	7,758	377,91
9	4,457	10,407	4,543	8,070	415,60
9,5	4,711	10,778	4,789	8,382	455,00
10	4,966	11,150	5,034	8,693	496,11
10,5	5,220	11,522	5,280	9,005	538,94
11	5,475	11,894	5,525	9,316	583,48
11,5	5,730	12,266	5,770	9,628	629,74
12	5,985	12,638	6,015	9,939	677,72
12,5	6,240	13,010	6,260	10,250	727,40
13	6,495	13,383	6,505	10,561	778,81
13,5	6,750	13,755	6,750	10,872	831,92
14	7,005	14,128	6,995	11,183	886,75
14,5	7,260	14,500	7,240	11,494	943,30
15	7,516	14,873	7,484	11,805	1001,56

**Приложение Г**  
(справочное)

Таблица Г.1 - Давление на границе удара при скоростях встречи 2 км/с.

Соударяющиеся пары	Давление в ГПа
Титан – Сталь	32,15
Титан – Медь	34,62
Титан – Свинец	32,15
Титан – Дюралюминий	21,81
Титан – Магний	15,17
Титан – Никель	36,33
Сталь – Титан	32,15
Сталь – Свинец	41,22
Сталь – Медь	44,85
Сталь – Дюралюминий	25,61
Сталь – Магний	17,01
Сталь – Никель	47,64
Магний – Сталь	17,01
Магний – Титан	15,17
Магний – Медь	17,65
Магний – Свинец	16,69
Магний – Дюралюминий	13,11
Магний – Никель	18,20
Никель – Сталь	47,64
Никель – Титан	36,33
Никель – Медь	51,12
Никель – Свинец	46,88
Никель – Дюралюминий	27,99
Никель – Магний	18,20
Медь – Титан	34,62
Медь – Сталь	44,85
Медь – Свинец	44,10
Медь – Дюралюминий	26,87
Медь – Магний	17,65
Медь – Никель	51,12
Свинец – Титан	32,15
Свинец – Сталь	41,22
Свинец – Медь	44,10
Свинец – Дюралюминий	25,11
Свинец – Магний	16,69
Свинец – Никель	46,88

Таблица Г.2 - Давление на границе удара при скоростях встречи 7,5 км/с.

Соударяющиеся пары	Давление в ГПа
Титан – Сталь	204,26
Титан – Медь	209,89
Титан – Свинец	204,26
Титан – Дюралюминий	126,67
Титан – Магний	90,85
Титан – Никель	219,44
Сталь – Титан	204,26
Сталь – Свинец	292,02
Сталь – Медь	299,25
Сталь – Дюралюминий	159,66
Сталь – Магний	108,68
Сталь – Никель	316,41
Магний – Сталь	108,68
Магний – Титан	90,85
Магний – Медь	112,37
Магний – Свинец	108,99
Магний – Дюралюминий	78,07
Магний – Никель	116,13
Никель – Сталь	316,41
Никель – Титан	219,44
Никель – Медь	333,38
Никель – Свинец	325,95
Никель – Дюралюминий	172,73
Никель – Магний	116,13
Медь – Титан	209,89
Медь – Сталь	299,25
Медь – Свинец	307,68
Медь – Дюралюминий	165,98
Медь – Магний	112,37
Медь – Никель	333,38
Свинец – Титан	204,26
Свинец – Сталь	292,02
Свинец – Медь	307,68
Свинец – Дюралюминий	161,23
Свинец – Магний	108,99
Свинец – Никель	325,95

Таблица Г.3 - Давление на границе удара при скоростях встречи 15 км/с.

Соударяющиеся пары	Давление в ГПа
Титан – Сталь	635,38
Титан – Медь	638,15
Титан – Свинец	635,38
Титан – Дюралюминий	375,08
Титан – Магний	271,89
Титан – Никель	665,60
Сталь – Титан	635,38
Сталь – Свинец	958,25
Сталь – Медь	955,62
Сталь – Дюралюминий	492,64
Сталь – Магний	338,41
Сталь – Никель	1007,61
Магний – Сталь	338,41
Магний – Титан	271,89
Магний – Медь	348,28
Магний – Свинец	344,24
Магний – Дюралюминий	234,28
Магний – Никель	359,58
Никель – Сталь	1007,61
Никель – Титан	665,60
Никель – Медь	1053,05
Никель – Свинец	1058,10
Никель – Дюралюминий	528,86
Никель – Магний	359,58
Медь – Титан	638,15
Медь – Сталь	955,62
Медь – Свинец	1001,56
Медь – Дюралюминий	509,11
Медь – Магний	348,28
Медь – Никель	1053,05
Свинец – Титан	635,38
Свинец – Сталь	958,25
Свинец – Медь	1001,56
Свинец – Дюралюминий	505,30
Свинец – Магний	344,24
Свинец – Никель	1058,10