

Министерство образования Российской Федерации

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НЕФТИ И ГАЗА им. И.М. ГУБКИНА**

Кафедра физики
Кафедра бурения нефтяных и газовых скважин

И.Н.Евдокимов
И.А.Ведищев

**ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
ПРИ БУРЕНИИ
НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН**

(I. Эффекты удара)

МОСКВА 2001

Предисловие.

Цель данного пособия – способствовать повышению уровня подготовки студентов по фундаментальным естественно-научным дисциплинам, в частности – по дисциплине “Физика”. Пособие рассчитано на студентов 1го-6го семестров обучения и содержит сведения о некоторых физических эффектах, проявляющихся при бурении нефтяных и газовых скважин, а также в сопутствующих технологических процессах.

При отборе излагаемого материала ставилась задача привлечь внимание к некоторым пробелам в традиционных программах обучения. Так, в настоящее время у многих инженеров-буровиков имеется недостаточно четкое понимание физико-механических процессов, протекающих в системе «долото - буровая колонна» при проходке скважины. Это можно объяснить, в частности, тем, что в общеобразовательных курсах физики и теоретической механики рассматриваемые примеры связаны в основном с деформациями и разрушением тел в условиях статического (или квазистатического) нагружения. Квазистатические модели лежат и в основе ряда специальных курсов, читаемых студентам (таких как механика горных пород, технология бурения и т.п.). Реальные же процессы в буровой скважине имеют существенно динамический характер, что может значительно исказить картину разрушения пород, наблюдаемую в статических условиях. Одна из основных причин этого - волновые эффекты, возникающие при разбурировании горной породы.

В пособии небольшого объема было возможно дать лишь качественное описание обсуждаемых эффектов, их взаимосвязи и условий осуществления. Точные математические формулировки и выводы соответствующих формул при необходимости можно найти в книгах по соответствующим разделам науки и техники.

В конце пособия приведены некоторые задачи по эффектам удара, предлагаемые студентам на экзаменах по курсу общей физики.

Эффекты удара (общие закономерности).

Удар - совокупность явлений, возникающих при столкновении движущихся (твердых) тел. Длительность удара обычно очень мала и на практике лежит в диапазоне от нескольких десятитысячных до миллионных долей секунды ($10^{-4} - 10^{-6}$ с). Развивающиеся в месте контакта тел ударные силы изменяются за время удара в широких пределах и могут достигать значений, при которых средние давления на площадках контакта составляют $10^9 - 10^{10}$ Па (десятки и сотни тысяч атмосфер). Действие ударных сил приводит к значительным изменениям скоростей точек тел. Следствиями удара могут быть также остаточные деформации, упругие (звуковые) колебания, нагревание тел, изменение механических свойств их материалов и др., а при скоростях соударения, превышающих критическую скорость V_c , - разрушение тел в месте удара. Для меди критическая скорость $V_c \approx 15$ м/с (54 км/час), а для тел из высококачественных сталей она возрастает до $V_c \approx 150$ м/с (540 км/час).

В общих физических теориях удара учитывается, что, в соответствии со вторым законом Ньютона, действующая на тело сила f определяет скорость изменения импульса тела $p = mV$:

$$\frac{dp}{dt} = f$$

а полное изменение импульса Δp за время T можно найти интегрированием

$$\Delta p = \int_0^T f dt$$

Изменение импульса, обусловленное действием ударных сил F часто обозначают символом S и называют ударным импульсом:

$$S = \int_0^{\tau} F dt = F_{cp} \tau$$

где F_{cp} – среднее значение ударной силы за время удара τ . Одновременно, ввиду малости τ , обычно пренебрегают изменениями импульса за счет действия всех неударных сил, таких например, как сила тяжести. Часто пренебрегают также и перемещениями тел за время удара.

Фундаментальные физические законы сохранения импульса и момента импульса позволяют, зная величину S и скорости тел в начале удара, определить скорости этих тел в конце удара. Для отыскания же самой величины ударного импульса S необходимо использовать соотношения, описывающие преобразования энергии. Весь процесс

соударения тел обычно разделяют на две фазы. Первая фаза начинается с момента соприкосновения точек тел. К концу этой фазы сближение тел прекращается, а часть их кинетической энергии переходит в потенциальную энергию деформации. Во второй фазе происходит обратный переход потенциальной энергии упругой деформации в кинетическую энергию тел. При этом тела расходятся. Для совершенно упругих тел механическая энергия к концу удара восстановилась бы полностью. У реальных тел механическая энергия к концу удара восстанавливается не полностью из-за затрат энергии на создание остаточных деформаций и на нагрев материала. Для совершенно неупругих тел удар заканчивается на первой фазе, остаточные деформации и потери механической энергии максимальны.

При определении времени удара, ударных сил и вызванных ими деформаций необходимо учитывать реальную форму тел, механические свойства материалов тел, изменения этих свойств за время удара, а также характер начальных и граничных условий. Подобный расчет представляет собой очень сложную задачу, что заставляет делать ряд существенных упрощающих предположений.

Так, классическая *контактная теория удара* основывается на упрощающем допущении, что время удара «велико» (по отношению к характерным временам колебательных и волновых процессах в соударяющихся телах). Это позволяет приближенно считать характер контактных взаимодействий и деформаций при любом реальном ударе таким же, как в условиях очень медленного (квазистатического) деформирования тел.

Наиболее простыми в контактной теории являются модели абсолютно упругого и абсолютно неупругого центральных ударов шаров. В этих моделях характеристики удара можно определить с использованием лишь законов сохранения, не рассматривая особенности действия реальных ударных сил.

Более современная *волновая теория удара* требует использования гораздо более сложного математического аппарата, но обеспечивает лучшее описание реально происходящих во время удара физических процессов. Согласно этой теории, деформации при ударе распространяются в сталкивающихся телах в виде упругой волны, переносящей энергию удара.

Эффекты, возникающие при квазистатическом деформировании тел.

При действии на любое тело внешних сил возникает его деформация (т.е. искажение формы и размеров тела), приводящая к появлению в теле механических напряжений и возникновению сил сопротивления деформированию. Характер зависимости сила-деформация обычно рассматривают при условии очень медленного (квазистатического) деформирования, когда можно считать, что в любой момент величина приложенной силы равна силе сопротивления материала тела.

Деформацию называют упругой, если она возникает и исчезает одновременно с нагрузкой и не сопровождается необратимыми затратами механической энергии. Простейший вид упругой деформации – растяжение или сжатие. Подобная деформация возникает в прямом тонком стержне длиной L и площадью сечения S , к концам которого приложены силы F , направленные вдоль оси стержня. Если при квазистатическом деформировании изменения длины Δx стержня малы, то деформация является упругой и выполняется закон Гука: $F=k\Delta x$, где k – коэффициент жесткости (жесткость), определяемый не только типом материала, но и формой и размерами тела. Напряжения σ при растяжении (сжатии) определяются силой, приходящейся на единицу площади сечения тела: $\sigma = F/S$. Выполнение закона Гука означает, что величина σ прямо пропорциональна относительному удлинению стержня $\varepsilon = \Delta x/L$:

$$\sigma = E \varepsilon.$$

Коэффициент E , характеризующий упругие свойства материала тела, называют модулем Юнга. В таблице приведены величины модуля Юнга для некоторых материалов

Материал	Сталь	Алюминий	Гранит	Мрамор
E , ГПа	200-220	69-71	49	56

При напряжениях (силах), превышающих некоторую величину σ_y (F_y), называемую пределом упругости, деформация приобретает пластический характер. Пластическая деформация сопровождается необратимыми затратами механической энергии и сохраняется при снятии нагрузки (остаточная деформация). Величина пластической деформации зависит не только от величин приложенных сил, но и от характера изменения приложенной нагрузки с течением времени. При дальнейшем увеличении деформации может наступить разрыв (разрушение) тела.

Горные породы по характеру зависимости прилагаемой силы нагрузки F (силы сопротивления породы) от величины деформации Δx (глубины внедрения инструмента) делят на три класса: А) хрупкие; Б) пластично-хрупкие; В) высокопластичные (и сильнопористые). Характерные зависимости $F(\Delta x)$ для однократного квазистатического деформирования показаны на рисунке.

Для хрупких пород (рисунок А) закон упругого деформирования Гука соблюдается вплоть до момента хрупкого разрушения при $F=F_p$.

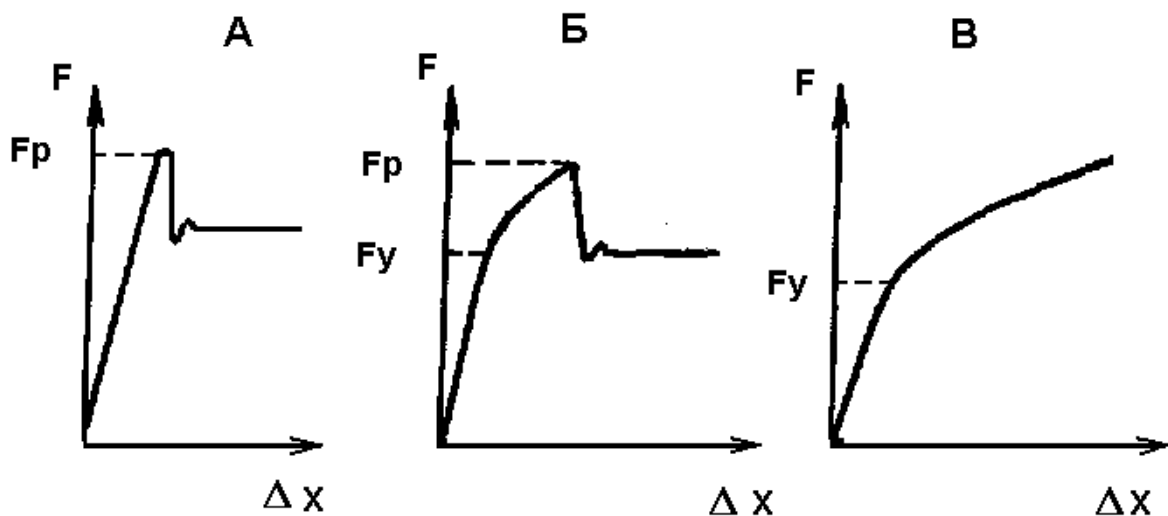
В пластично-хрупких породах (рисунок Б) закон Гука выполняется вплоть до предела упругости F_y , при преодолении которого начинают осуществляться эффекты пластичности. Стадия пластичности наблюдается вплоть до начала хрупкого разрушения при $F=F_p$.

В качестве показателя степени пластичности пород часто используют отношение

$$\mu = A_p/A_y$$

где A_p – полная работа деформирования до момента разрушения, A_y – работа упругого деформирования. В хрупких породах $A_p=A_y$ и показатель $\mu=1$. В пластично-хрупких породах $A_p>A_y$ и, соответственно, $\mu>1$. С увеличением степени пластичности величина показателя μ возрастает.

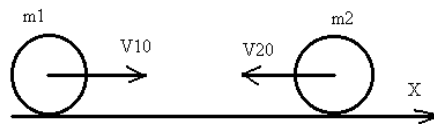
В высокопластичных или сильнопористых горных породах (рисунок В) также наблюдаются эффекты упругого и пластического деформирования, однако хрупкого разрушения не происходит и коэффициент пластичности условно принимают равным бесконечности.



Абсолютно неупругий удар.

Абсолютно неупругий удар – соударение твердых тел, в процессе которого происходит заметное пластическое деформирование материала тел. В результате, остаточные деформации настолько велики, что после завершения удара тела как бы «слипаются» и движутся как единое тело. В процессе пластического деформирования начальная механическая энергия системы тел необратимо переходит в другие, немеханические, виды энергии. Таким образом, при абсолютно неупругом ударе закон сохранения механической энергии не выполняется и для определения скорости после удара используют закон сохранения полного импульса системы тел.

В качестве простейшей расчетной модели рассмотрим прямой центральный удар двух шаров, движущихся без вращения навстречу друг другу по идеально гладкой поверхности :



Векторное уравнение закона сохранения импульса при абсолютно неупругом ударе :

$$m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2 = (m_1 + m_2) \vec{U}$$

Здесь \vec{V}_1 и \vec{V}_2 – скорости первого и второго тел до удара, \vec{U} – скорость объединившихся тел после удара.

Отсюда следует, что для случая, показанного на рисунке (V_{10} и V_{20} – модули начальных скоростей тел):

1) скорость тел после удара (в проекции на ось X):

$$U = \frac{m_1 V_{10} - m_2 V_{20}}{(m_1 + m_2)}$$

2) величина (модуль) ударного импульса :

$$S = F_{cp} \tau = \frac{m_1 m_2 (V_{10} + V_{20})}{(m_1 + m_2)}$$

3) необратимые потери начальной кинетической энергии системы тел за время удара:

$$\Delta E_{кин} = \frac{m_1 m_2 (V_{10} + V_{20})^2}{2(m_1 + m_2)}$$

Абсолютно упругий удар.

Абсолютно упругий удар – соударение твердых тел, в процессе которого осуществляются только упругие деформации. Поэтому после завершения удара форма тел восстанавливается полностью и начальная механическая энергия системы тел не переходит в другие, немеханические, виды энергии.

При ударе в зоне контакта возникают большие силы – кинетическая энергия переходит полностью или частично в потенциальную энергию упругой деформации. При восстановлении формы тел энергия упругой деформации вновь переходит в кинетическую энергию и тела разлетаются со скоростями, которые определяются двумя законами сохранения – полного импульса и полной механической энергии системы тел.

В качестве простейшей расчетной модели опять можно рассмотреть удар двух шаров, сближающихся по прямой, проходящей через их центры (прямой центральный удар). Предполагается, что поверхность, по которой движутся шары, идеально гладкая, так что ни до ни после удара шары не вращаются и движение имеет чисто поступательный характер :

Законы сохранения импульса и энергии для абсолютно упругого удара:

$$m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2 = m_1 \vec{U}_1 + m_2 \vec{U}_2$$

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2}$$

Здесь V_1 и V_2 – скорости тел до удара; U_1 и U_2 – скорости после удара.

Решая эту систему уравнений, находим скорости тел после удара:

$$\vec{U}_1 = \frac{2m_2 \vec{V}_2 + (m_1 - m_2)\vec{V}_1}{(m_1 + m_2)} \quad \vec{U}_2 = \frac{2m_1 \vec{V}_1 + (m_2 - m_1)\vec{V}_2}{(m_1 + m_2)}$$

В частности, если массы шаров одинаковы, то при ударе они обмениваются скоростями:

$$\vec{U}_2 = \vec{V}_1 \quad \vec{U}_1 = \vec{V}_2$$

Если масса тела 2 во много раз больше массы тела 1 (удар о массивную стенку), то скорость легкого тела меняет направление, скорость массивного тела остается практически неизменной:

$$\vec{U}_1 \approx 2\vec{V}_2 - \vec{V}_1 \quad \vec{U}_2 \approx \vec{V}_2$$

Эффекты удара для реальных тел.

При ударе реальных тел в большинстве случаев осуществляется как упругое, так и пластическое деформирование. Поэтому механическая энергия к концу удара обычно восстанавливается лишь частично вследствие потерь на образование остаточных напряжений и деформаций, на нагрев тел и т.п. Эти частичные потери энергии при технических расчетах характеризуют введением *коэффициента восстановления*, зависящего от физических свойств материалов тел :

$$k = -\frac{\vec{U}_1 - \vec{U}_2}{\vec{V}_1 - \vec{V}_2}$$

С учетом коэффициента восстановления, при прямом центральном ударе шаров их скорости после удара:

$$\vec{U}_1 = \vec{V}_1 - \frac{(1+k)(\vec{V}_1 - \vec{V}_2)m_2}{m_1 + m_2} \quad \vec{U}_2 = \vec{V}_2 + \frac{(1+k)(\vec{V}_1 - \vec{V}_2)m_1}{m_1 + m_2}$$

и ударный импульс :

$$S = F_{cp} \tau = \frac{(1+k)(\vec{V}_1 - \vec{V}_2)m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

Потери кинетической энергии системы тел за время удара:

$$\Delta E_{кин} = \frac{(1-k^2)(\vec{V}_1 - \vec{V}_2)^2 m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)}$$

В предельных случаях - при абсолютно упругом ударе $k=1$, а при абсолютно неупругом ударе $k=0$. Для реальных материалов значение k определяют например, измеряя конечную высоту h , на которую отскакивает шарик, падающий на горизонтальную плиту с начальной высоты H . При этом :

$$k = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

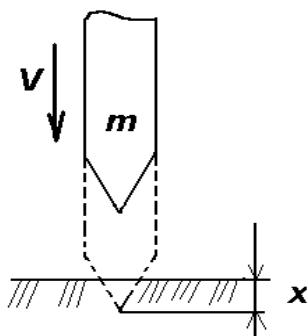
В таблице приведены численные значения коэффициентов восстановления для некоторых материалов

Материал	Коэффициент k
Дерево	0,50
Мягкая сталь	0,55
Стекло	0,94

Использование эффектов удара в способах бурения.

Главным при бурении на нефть и газ пока является механический метод воздействия на породу забоя скважины породоразрушающими инструментами в виде буровых долот, бурильных головок и коронок.

Механический метод разрушения пород реализуется вращательным и ударными способами бурения. Сочетание ударного и вращательного способов дает ударно-вращательный или комбинированный способ бурения. При вращательном способе бурения эффекты удара не возникают - порода разрушается вращающимся долотом, находящимся в *постоянном контакте* с породой.



При ударном способе бурения используют долота дробящего действия, которым сообщается вертикальное возвратно-поступательное движение. В этом случае долото наносит периодические *прямые удары* по породе на поверхности забоя скважины и скважина как бы выдалбливается ударами инструмента.

В практике бурения встречаются породы с большим разбросом механических свойств. Кроме того, элементы вооружения используемых породоразрушающих инструментов могут иметь весьма сложную форму рабочей поверхности. Поэтому полное математическое описание физических эффектов, происходящих при ударном способе бурения, возможно дать лишь для простейших модельных случаев. В этих моделях используют контактную теорию удара (приближение квазистатического деформирования) и деформацию породы считают упругой. Не учитывают и особенности формы долота (наличие заостренных кромок, клиновидных зубьев и т.п.) - долото описывают как недеформируемое тело (ударник) в форме вертикального цилиндра с плоским основанием.

Пусть по поверхности забоя скважины наносится удар свободно падающим модельным долотом (ударником) на которое действует только сила тяжести $F_m = mg$, где m – масса долота и ударной штанги. Скорость долота в момент контакта с горной породой V_o определяется начальной высотой подъема штанги h :

$$V_o = \sqrt{2gh}$$

При этом кинетическая энергия в момент удара :

$$E_{кин} = \frac{mV_o^2}{2}$$

Сопротивление горной породы деформированию вызывает торможение движущегося долота. Сила сопротивления внедрению долота в модели упругого деформирования прямо пропорциональна глубине его погружения x (величине смещения поверхности породы):

$$F(x) = k_n x ,$$

где k_n – коэффициент, зависящий от свойств горной породы (жесткость породы). Тогда потенциальная энергия деформирования породы:

$$E_{ном} = \int_0^x F(x) dx = \frac{k_n}{2} x^2 .$$

Работа силы F_m , постоянно действующей на долото:

$$A = F_m x = mgx .$$

Максимальные значения силы сопротивления F_{max} и энергии деформирования $(E_{ном})_{max}$ достигаются при наибольшей глубине погружения x_{max} - в тот момент когда скорость долота снизится до нуля.

$$F_{max} = k_n x_{max} ,$$

$$(E_{ном})_{max} = \frac{F_{max} x_{max}}{2}$$

или

$$(E_{ном})_{max} = \frac{k_n x_{max}^2}{2}$$

В модели квазистатического упругого деформирования предполагается, что при ударе долота о горную породу всегда выполняется условие $E_{кин} + A = E_{ном}$, из которого нетрудно определить наибольшую силу сопротивления породы:

$$F_{max} = F_m + \sqrt{F_m^2 + mk_n V_o^2}$$

и максимальную глубину погружения долота:

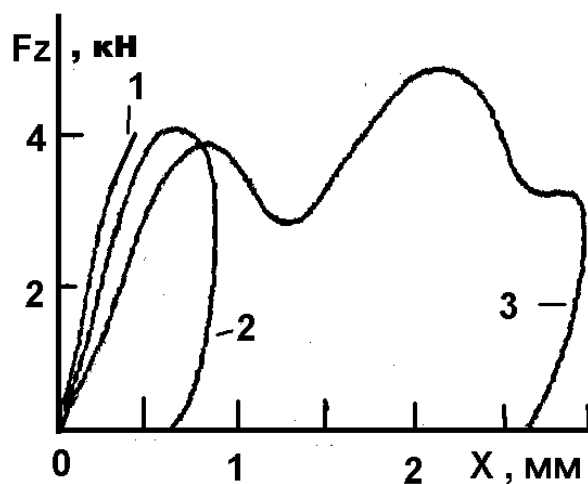
$$x_{max} = \frac{F_m}{k_n} + \sqrt{\left(\frac{F_m}{k_n}\right)^2 + \frac{m}{k_n} V_o^2}$$

Из последнего соотношения следует, что зависимость $x_{max}(V_o)$ является гораздо более резкой, чем зависимость $x_{max}(m)$. Поэтому для увеличения глубины погружения долота при каждом ударе выгоднее всего не увеличивать массу долота и ударной штанги, а повышать скорость инструмента (энергию удара). Этого можно достичь, разгоняя ударную штангу дополнительной постоянной силой F_p (например, используя сжатый воздух). Приведенные формулы для расчета величин F_{max} и x_{max} будут справедливы и в этом случае, если в них силу F_m заменить на сумму сил $(F_m + F_p)$.

Особенности механизмов деформирования и разрушения реальных горных пород при ударе.

Закономерности деформирования тел при быстрых ударах (динамическом нагружении) могут заметно отличаться от сравнительно простых характеристик медленного (квазистатического) деформирования. Теоретический анализ закономерностей динамического деформирования представляет собой очень сложную задачу. Поэтому для выяснения параметров деформаций и особенностей разрушения реальных горных пород при ударном способе бурения проводят лабораторные измерения, применяя так называемые копровые экспериментальные установки. В этих установках осуществляют удар как свободно падающим ударником (моделью долота), так и ударником, разгоняемым дополнительной силой. В процессе измерений непрерывно производят запись величины силы сопротивления породы F_z , направленной вдоль оси ударной штанги и величины перемещения ударника x относительно поверхности породы.

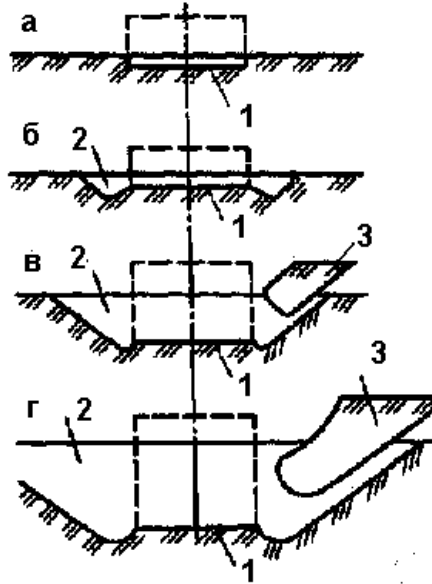
Характерные экспериментальные зависимости $F_z(x)$ при ударе о мрамор приведены на первом рисунке. Графики получены при постоянной массе ударника m и нескольких значениях кинетической энергии удара $E_{кин}$ (начальной скорости удара V_0).



Из рисунка видно, что при увеличении энергии удара изменяется характер зависимостей $F_z(x)$. При очень малых значениях $E_{кин}$ деформации являются практически упругими, зависимость $F_z(x)$ близка к линейной и может быть описана законом Гука (кривая 1, для $E_{кин}=0,1$ Дж). При повышении энергии удара возникают остаточные деформации и зависимости силы от деформации при нагрузке и разгрузке не совпадают — зависимость $F_z(x)$ представляет собой петлю гистерезиса (кривая 2, для $E_{кин}=2,3$ Дж). Ширина петли увеличивается при возрастании $E_{кин}$. При высоких энергиях удара график сила — перемещение представляет собой

петлю сложной формы с чередующимися максимумами и минимумами (кривая 3, для $E_{кин}=10,5$ Дж).

Схемы развития зоны ударного разрушения породы показаны на втором рисунке. Здесь: 1 – поверхность контакта породы с ударником; 2 – лунка разрушения породы; 3 – обломки разрушенной породы.



При малых энергиях (скоростях) удара поверхность породы восстанавливается полностью и следов разрушения на ней не заметно (упругое деформирование). Этим условиям соответствует зависимость $F_z(x)$, описываемая кривой 1 на первом рисунке. При небольшом увеличении энергии удара на поверхности остается лишь след ударника (остаточная деформация) в виде зоны трещин, окружающих контур ударника (схема а).

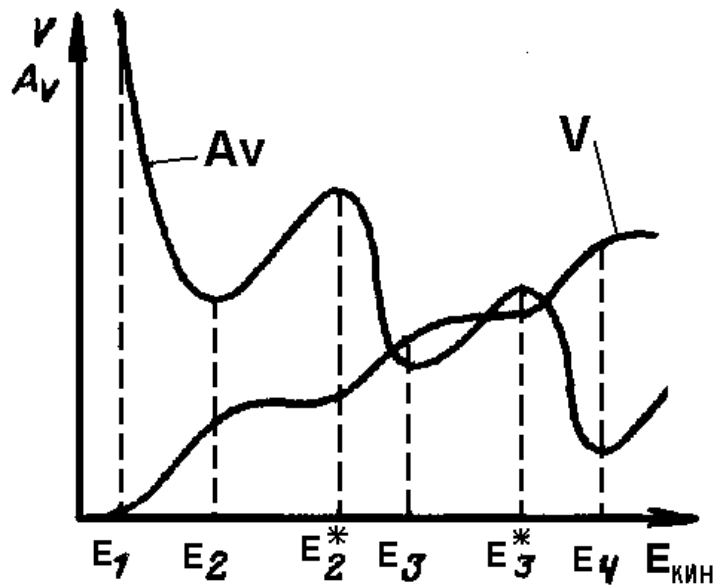
Дальнейшее увеличение энергии удара приводит к появлению кругового скола породы за контуром ударника (схема б). Этот вид разрушения назван *первой формой хрупкого разрушения*. С увеличением энергии удара объем скола вокруг ударника возрастает.

При достижении некоторой энергии удара начинается хрупкое разрушение породы под самим ударником (схема в). Этот вид разрушения назван *второй формой разрушения* породы и ему соответствует зависимость $F_z(x)$, описываемая кривой 2 на первом рисунке. Осколки породы получаемые при этом, несут на себе следы и первой формы разрушения.

При дальнейшем росте энергии удара происходит еще одно скачкообразное усложнение зоны разрушения (схема г) и устанавливается новая, *третья форма разрушения*, которой соответствует кривая 3 на зависимости $F_z(x)$.

Энергоемкость разрушения горных пород при ударе.

Описанная в предыдущем разделе скачкообразность развития форм разрушения горных пород ведет к тому, что при увеличении начальной кинетической энергии удара $E_{кин}$ происходит немонотонное увеличение как объема разрушения V , так и энергоемкости разрушения породы при ударном воздействии A_v , которую определяют как энергию, затрачиваемую на разрушение единицы объема породы: $A_v = E_{кин}/V$. На рисунке показаны характерные особенности зависимостей $V(E_{кин})$ и $A_v(E_{кин})$, наблюдаемых в реальных условиях.



В интервале энергий от E_1 до E_2 осуществляется переход от первой формы разрушения ко второй и наблюдается существенный рост объема разрушения, что ведет к появлению первого минимума на кривой энергоемкости. Дальнейшее увеличение энергии от E_2 до E_2^* не приводит к существенному изменению объема и энергоемкость вновь увеличивается. При $E_{кин} > E_2^*$ вновь наблюдаются рост объема разрушения и второй минимум A_v , связанный началом третьей формы разрушения вблизи энергии E_3 . При развитии третьей формы разрушения снова стабилизируется объем разрушения и возрастает энергоемкость в области энергий от E_3 до E_3^* . По мере увеличения $E_{кин}$ наблюдаются новые области стабилизации объема разрушения и соответствующие экстремумы энергоемкости, причем каждый последующий минимум и максимум зависимости $A_v(E_{кин})$ ниже предыдущих, то есть при увеличении энергии удара проявляется общая тенденция к уменьшению энергоемкости ударного разрушения пород.

Волновая теория удара.

Контактная теория удара, основанная на приближении медленного (квазистатического) деформирования, не дает полного объяснения многих процессов, осуществляющихся в производственных условиях.

Лучшее описание реально наблюдаемых закономерностей дает *волновая теория удара*, учитывающая характер изменения ударных сил, влияние продолжительности удара и особенности механических свойств материалов. Наиболее простой вид имеет волновая теория удара тел в приближении упругого деформирования, при отсутствии остаточных деформаций. Деформации распространяются в таких телах в виде упругих волн со скоростью u , зависящей от физических свойств материалов.

Упругие (звуковые) волны могут существовать в твердых, жидких и газообразных средах. Характерная особенность упругих волн – независимость скорости u от амплитуды и геометрии волны (плоская, сферическая, цилиндрическая волны). Распространение упругой волны сопровождается переносом энергии упругой деформации при отсутствии переноса вещества. Энергия, переносимая волной, описывается вектором Умова-Пойнтинга (вектором плотности потока энергии) :

$$J = w u$$

где w – энергия в единице объема, занятого волной.

Для тел, имеющих форму стержней, скорость распространения продольных упругих волн (звука) u определяется модулем упругости (модулем Юнга) E и плотностью ρ материала стержня:

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

В таблице приведены значения скорости u для некоторых металлов :

Материал	Скорость звука, (м/с)
Алюминий	6260
Сталь	6100
Латунь	4430
Медь	4700

Контактная теория удара применима лишь в случаях, когда время прохождения упругих волн через все тело много меньше времени удара. Только при этом можно пренебречь влиянием волновых процессов и считать характер взаимодействий при ударе таким же, как в статическом

состоянии. На таких допущениях была основана классическая контактная теория удара Г. Герца, расчеты по которой при прямом центральном ударе дают следующие выражения для величины ударной силы:

$$F = n \alpha^{3/2}$$

и времени удара :

$$\tau = 2,94 \alpha_{\max} / V_{\text{соуд}}$$

Здесь $V_{\text{соуд}} = |V_{10} - V_{20}|$ - скорость соударения, α - величина сближения центров масс тел, n - коэффициент, зависящий от упругих свойств материалов тел и их формы в окрестностях точки контакта.

Так, при соударениях одинаковых шаров радиуса R максимальная ударная сила:

$$F_{\max} \sim (V_{\text{соуд}})^{6/5}$$

и продолжительность удара:

$$\tau = C R (V_{\text{соуд}})^{-1/5}$$

где C - постоянная определяемая материалом тел. Например, для двух одинаковых стальных шаров радиусом $R=3,8$ см, при скорости соударения $V_{\text{соуд}}=2,5$ м/с, ударная сила достигает величины $F_{\max} \approx 45000$ Н, а время удара $\tau \approx 1,8 \cdot 10^{-4}$ с. Учитывая, что для стали скорость звука равна, примерно, 6 км/с, то при указанных условиях время прохождения волны через весь шар $t = 2R/u = 1,2 \cdot 10^{-5}$ с - на порядок меньше времени удара, что оправдывает справедливость использования контактной теории.

Если время прохождения упругих волн через тело сравнимо со временем удара, то для расчетов необходимо использовать волновую теорию удара. По этой теории, при продольном совершенно упругом ударе одинаковых стержней скорость упругой волны u является основным параметром, определяющим ударную силу:

$$F = S_n \rho u V_{\text{соуд}}$$

и время соударения:

$$\tau = 2 L / u .$$

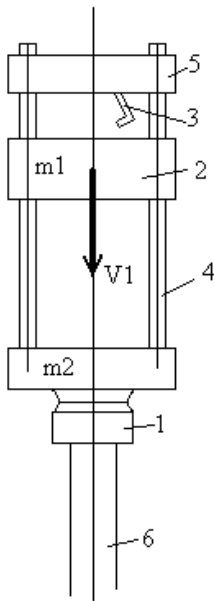
Здесь ρ - плотность материала, L - длина и S_n - площадь поперечного сечения стержней.

Несмотря на значительные математические затруднения, при разработке современных технологий бурения уже учитывают, что подведение энергии к долоту посредством такого протяженного привода, как бурильная колонна, может существенно исказить картину разрушения породы, наблюдаемую в лабораторных условиях, и причина этого - именно волновые процессы, имеющие место в системе «долото - бурильная колонна» при разбурировании горной породы.

Проявления волновых эффектов при использовании процессов удара тел в производственных условиях.

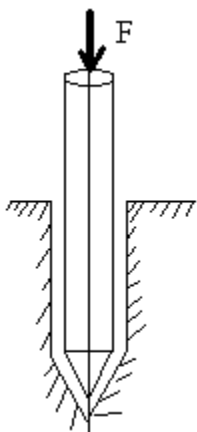
Волновые эффекты возникают не только в процессах, связанных с бурением скважин, но и во многих сопутствующих производственных процессах, например, в процессах забивания свай, анкеров, заклепок и т.п. при строительстве, эксплуатации и ремонте буровой.

Примером используемого оборудования может служить свайный молот, устройство которого показано на рисунке.



Детали свайного молота:

- 1 – Наголовник
- 2 – Ударная часть
- 3 – Крюк для подъема ударной части при пуске молота
- 4 – Направляющая штанга ударной части
- 5 – Траверса
- 6 – Забиваемая свая



При забивании свай в грунт удары по ее верхнему концу вызывают распространение продольных волн упругих напряжений вдоль оси сваи. Приблизительно можно считать, что в верхней части сваи энергия упругой волны равномерно распределена по всей поверхности плоского фронта волны (поперечному сечению сваи). При приближении к заостренной части сваи волна перестает быть плоской и площадь фронта волны быстро сокращается. В результате растет величина энергии в единице объема a , следовательно, и амплитуда упругих колебаний в области заостренной части сваи. Развиваются значительные давления, способствующие раздвижению слоев грунта и, следовательно, перемещению сваи вглубь среды.

Эффект гидравлического удара.

Данный эффект может быть объяснен только с использованием волновой теории. Гидравлический удар - резкое повышение давления в трубопроводе с движущейся жидкостью, возникающее при быстром перекрытии запорных устройств и способное привести к разрыву стенок труб и повреждению арматуры трубопровода. Скачок давления распространяется по трубе в виде упругой волны со скоростью u , определяемой коэффициентом сжимаемости и плотностью жидкости, модулем упругости материала трубы, ее диаметром и толщиной стенок. Для потоков воды в стальных и чугунных трубах $u \approx 1000 - 1350$ м/с.

Если жидкость плотности ρ течет со скоростью v в трубопроводе с площадью сечения S , а задвижка в конце трубопровода закрывается за время $(\Delta t)_z$, то возникает увеличение давления Δp . В прилегающем к задвижке слое жидкости длиной $\Delta l = u(\Delta t)_z$ и массой $m = \rho S \Delta l$, теряется импульс $\Delta(mv) = \rho S \Delta l v$. По второму закону Ньютона изменение импульса определяется величиной действующей силы: $\Delta(mv) / (\Delta t)_z = F$. Учитывая, что $F = \Delta p S$, получаем выражение для величины скачка давления:

$$\Delta p = \rho v u \quad (1)$$

Образующееся при гидравлическом ударе повышение давления распространяется против течения жидкости и через время L/u (L - длина трубопровода) достигает резервуара. Здесь давление падает, и это падение давления передается обратно к задвижке с той же скоростью в виде отраженной волны (волна понижения). Циклы повышений и понижений давления чередуются через промежутки времени $2L/u$, пока этот колебательный процесс не затухнет из-за потерь энергии на трение и деформацию стенок.

Формула (1) действительна лишь в случае, когда время закрытия запорного устройства сравнительно мало, т.е. при условии $(\Delta t)_z \ll 2L/u$. При $(\Delta t)_z > 2L/u$ отраженная волна придет к запорному устройству раньше, чем задвижка закроется, и повышение давления в трубопроводе уменьшится. В этом случае величина скачка давления:

$$\Delta p = 2\rho v L / (\Delta t)_z \quad (2)$$

Так как в большинстве случаев гидравлический удар - нежелательное явление, приводящее к разрушению трубопроводов, то для снижения воздействия удара (скачка давления Δp) увеличивают время закрытия $(\Delta t)_z$ и уменьшают длину L трубы, присоединяя водяные колонны, пневматические резервуары (воздушные колпаки), устанавливая предохранительные клапаны.

Использование эффекта гидравлического удара в технике.

Положительное действие гидравлического удара проявляется в специальных типах промышленного оборудования, в частности, в особых насосах - гидравлических таранах. Так, на рисунке показано устройство водяного гидравлического тарана, в котором для подачи воды на высоту до 40 метров используется повышение в нем давления при периодически создаваемых гидравлических ударах. В период разгона при кратковременном открытии клапана 4 в подводящей трубе 6 под действием подпора создается поток воды, которая сбрасывается через этот клапан. Когда силовое воздействие воды превысит силу веса клапана, он поднимается. Быстрое закрытие клапана 4, а, следовательно, внезапная остановка воды, вызывает гидравлический удар. Резкое повышение давления открывает клапан 5, через который выходит некоторое количество воды. В рабочем периоде вода по трубопроводу 2 поступает в верхний бак 1, преодолев напор $H > h$. Сжатый воздух, находящийся в напорном колпаке 3, выравнивает подачу воды по трубопроводу 2. В конце второго периода давление в клапанной коробке немного снижается, поэтому клапан 5 закрывается, а клапан 4 открывается, что обеспечивает автоматическое повторение цикла. КПД гидравлического тарана зависит от напора и равен 0,92 для отношения $H/h = 1$, и 0,26 для $H/h = 20$.

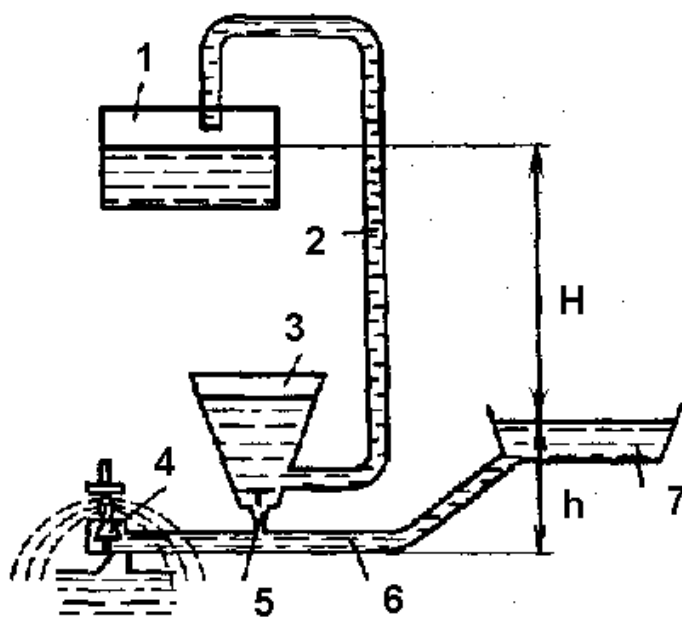


Схема гидравлического тарана.

Эффект ударной волны.

Ударная волна - физический эффект, наблюдающийся при ударах с очень большими скоростями, в частности, при воздействии взрыва, который в случае непосредственного контакта заряда с телом можно считать эквивалентным соударению со скоростью до нескольких км/с.

Ударная волна (скачок уплотнения) – распространяющаяся в среде со сверхзвуковой скоростью тонкая переходная область, в которой происходит резкое увеличение плотности давления и скорости вещества. Так, при взрывах, граница, которая отделяет сжатый воздух от невозмущенного, и представляет собой ударную волну (или, как говорят, - фронт ударной волны). Именно ударная волна оказывает механическое воздействие на окружающие объекты при взрыве.

Основные отличия ударных волн от упругих (звуковых) волн:

1). Скорость распространения ударных волн всегда больше скорости звука в невозмущенной среде. 2). На фронте ударной волны параметры состояния и движения среды изменяются скачком. 3). Ударные волны сопровождаются перемещением среды в направлении распространения фронта возмущения. 4). Скорость ударной волны зависит от ее интенсивности, что не наблюдается для звуковых волн. 5). При образовании ударных волн энтропия среды возрастает. 6). Ударная волна не имеет периодического характера, а распространяется в виде одиночного скачка уплотнения.

Классический пример возникновения и распространения ударной волны – опыт по сжатию газа в трубе с поршнем. Если поршень вдвигается в газ медленно, со скоростью V , меньшей, чем скорость звука в среде u , то по газу со скоростью звука бежит упругая (звуковая) волна сжатия. Если скорость поршня $V > u$, то возникает ударная волна, распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью $V_{y\partial}$ (при этом $V_{y\partial} > V$).

Толщина ударной волны очень мала – порядка длины свободного пробега молекул. При прохождении газа через ударную волну параметры газа (давление, плотность, энтропия и т.п.) меняются разрывным образом – скачком.

Параметры газа в ударной волне зависят от числа Маха $M = V_{y\partial}/u$. В простейшем случае идеального газа с постоянной теплоемкостью получены теоретические формулы для оценки скачков плотности, давления и т.п. Для очень интенсивных ударных волн (при $M \rightarrow \infty$) теоретически рассчитываемое предельное сжатие достигает величины

$$\rho_1/\rho_0 = (\gamma + 1)/(\gamma - 1)$$

где ρ_1 – плотность газа за фронтом ударной волны, ρ_0 – начальная плотность газа, $\gamma = c_p/c_v$ – показатель адиабаты. Для одноатомного идеального газа $\gamma = 5/3$ и теоретическое предельное сжатие равно 4. Для двухатомных газов (и для воздуха) $\gamma = 7/5$ и предельное сжатие равно 6.

В реальном газе при высоких температурах происходят сложные молекулярные процессы и параметры за фронтом ударной волны можно определить лишь численными расчетами на основе систем уравнений, удовлетворяющих условиям сохранения потоков массы, импульса и энергии через фронт волны. В таблице приведены расчетные величины сжатия ρ_1/ρ_0 , а также давления p_1 и температуры T_1 за фронтом ударных волн, распространяющихся с различными скоростями $V_{уд}$ по воздуху при нормальных условиях ($p_0 = 1$ атм, $T_0 = 293$ К, $\rho_0 = 1,29 \cdot 10^{-3}$ г/см³).

$V_{уд}$, м/с	ρ_1/ρ_0	p_1 , атм	T_1 , К
330	1	1	293
700	2,84	5	482
980	3,88	10	705
2150	6,04	50	2260
3350	8,58	127	4000
6970	11,00	561	10000

Ударные волны в твердых телах приходится рассматривать с учетом не только теплового движения, но и взаимодействия частиц (тепловые и упругие составляющие). Общей теории этих сложных процессов не существует и ударные адиабаты для твердых (и жидких) тел определяют из опытных данных. Например, в таблице приведены опытные данные для параметров за фронтом ударной волны в свинце.

$V_{уд}$, м/с	ρ_1/ρ_0	p_1 , атм	T_1 , К
3200	1,3	25 000	1 050
6500	1,9	2 250 000	15 100
8100	2,2	4 010 000	26 400

В технических приложениях наибольшее значение имеют “слабые” ударные волны с давлениями 10 000 – 100 000 атмосфер и скоростями распространения от 2000 до 9000 метров в секунду.. Это – типичные параметры для взрывов в жидкостях, ударах продуктов взрыва о преграды.

Кумулятивный эффект.

При обычном взрыве возникают расходящиеся во все стороны ударные волны (преимущественно сферические). С удалением от места взрыва механические эффекты резко снижаются вследствие крутого падения давления, скорости и других параметров продуктов взрыва. В случае сферической симметрии давление в газообразных продуктах взрыва уменьшается обратно пропорционально R^3 , где R - расстояние от источника взрыва. Это следует из того, что сильно сжатые продукты детонации расширяются по закону $PV^k = const$, где $k=3$, а $V \sim R^3$.

При осуществлении кумулятивного эффекта ударные волны становятся сходящимися и происходит резкое увеличение плотности энергии в некоторой области пространства, что ведет к значительному повышению разрушительного действия взрыва в необходимом направлении.

Кумулятивный эффект достигается с помощью использования специальных зарядов, устройство которых показано в левой части рисунка. Во взрывчатом веществе **2** имеется выемка (например, коническая) в противоположной от детонатора **1** части заряда. Выемка покрыта металлической оболочкой **3** толщиной от долей миллиметра до миллиметра. В качестве материала оболочки чаще всего используют медь, бериллий и сталь.

В правой части рисунка показано, как после срабатывания детонатора продукты взрыва **5** перемещаются вдоль оси заряда за фронтом ударной волны **6**. Волна разрушает коническую оболочку **3**, начиная от ее вершины, и сообщает металлу оболочки большую скорость. Давление продуктов взрыва значительно превосходит предел прочности металла и поэтому движение разрушаемой металлической оболочки подобно течению жидкой пленки. Движущийся металл образует поток, сходящийся под углом к оси конуса и переходящий в тонкую металлическую струю **4**, перемещающуюся вдоль оси с очень большой скоростью (доходящей до 12-15 км/с). Действие этой струи обуславливает высокую проникающую способность взрыва кумулятивного заряда. Давление, возникающее при столкновении струи с твердой преградой, настолько превышает напряжение разрушения любых материалов, что прочность преграды не играет существенной роли и в расчетах ее можно рассматривать как жидкость.

Из гидродинамической теории кумуляции следует, что скорость кумулятивной струи существенно возрастает с уменьшением угла α при вершине конической выемки:

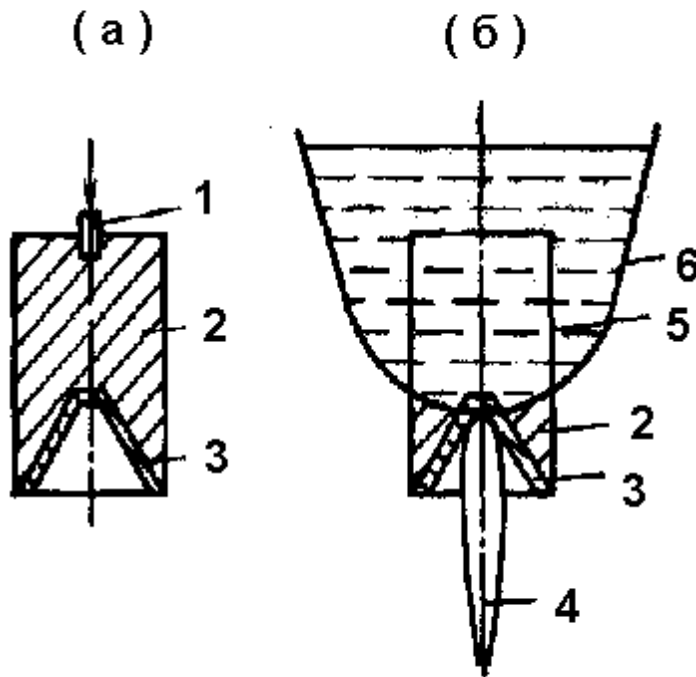
$$V_k = V_0 / \operatorname{tg}(\alpha/2),$$

где V_0 - скорость, сообщаемая взрывными газами металлу оболочки. Величина V_0 зависит от толщины и плотности материала оболочки, а также от толщины и плотности взрывчатого вещества.

Давление металлической кумулятивной струи с плотностью ρ_0 на преграду, например, на пластину из такого же металла

$$P_k = (V_k)^2 \rho_0 / 4.$$

При использовании стальных оболочек и современных взрывчатых веществ это давление может достигать $3-4 \cdot 10^{11}$ Па, то есть нескольких миллионов атмосфер.



Кумулятивный эффект

- (а) Устройство кумулятивного заряда.
 (б) Схема формирования кумулятивной струи.

Использование кумулятивного эффекта в технике.

Области технического применения кумулятивного эффекта – горное дело, обработка металлов и т.п. Большое распространение получили способы сварки металлов и других материалов с помощью кумуляции. Так, при угловой сварке взрывом, схема которой показана на рисунке, лист металла **1**, который нужно приварить к основной металлической пластине **2**, помещают под небольшим углом $\alpha=2-10^\circ$. На всей поверхности привариваемого листа располагают слой взрывчатого вещества **4**, инициируемого от детонатора **5**. Пластины **2** устанавливают на жесткую опору **3**. Под воздействием ударной волны, возникающей при взрыве, элементы металлического листа **1** последовательно приобретают большую скорость и соударяются с основной пластиной. В зоне соударения возникает высокое давление, температура металлов резко возрастает и они переходят в жидкое состояние, образуя кумулятивную струю. В результате получают полноценное соединение свариваемых деталей.

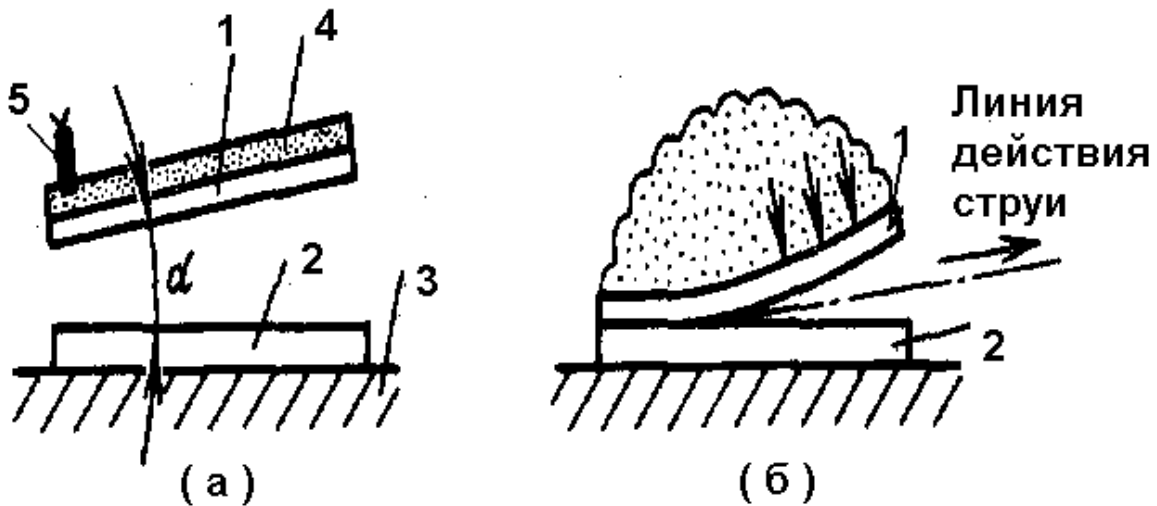


Схема сварки взрывом.

- (а) Расположение деталей до взрыва.
 (б) Формирование кумулятивной струи при взрыве.

Некоторые задачи по эффектам удара, предлагаемые на экзаменах по курсу общей физики.

Абсолютно упругий удар.

1. Шар массой 2 кг абсолютно упруго сталкивается с покоящимся шаром большей массы 12 кг. После удара первый шар изменяет направление своего движения на 90° . Определите, во сколько раз уменьшилась энергия первого шара после удара.

2. Один шар налетает со скоростью 2 м/с на другой шар такой же массы, первоначально покоящийся. Происходит абсолютно упругий удар. После соударения первый шар движется под углом 30° к первоначальному направлению движения. Найдите скорости шаров после удара. Под каким углом станет двигаться второй шар?

Абсолютно неупругий удар.

3. Один шар соударяется с другим, неподвижным, масса которого в три раза меньше. Удар - абсолютно неупругий, центральный. Сколько процентов первоначальной кинетической энергии переходит в тепло при ударе?

4. Тело массы 1 кг, движущееся со скоростью $\vec{v}_1 = 3\vec{i} + 2\vec{j} - \vec{k}$ (м/с), испытывает абсолютно неупругое соударение с телом массы 2 кг, имеющим в момент соударения скорость $\vec{v}_2 = -2\vec{i} + 2\vec{j} + 4\vec{k}$ (м/с). Запишите выражение для вектора скорости тела, образовавшегося после удара, и определите величину этой скорости. Определите, чему равна величина механической энергии, перешедшей при ударе в другие формы энергии. (Потенциальная энергия при ударе не изменилась).

Удар с потерей части механической энергии.

5. Стальной шарик массой 10 г упал с высоты 1 м на стальную плиту и подскочил после удара на высоту 0,8 м. Определите модуль изменения импульса шарика при ударе и количество тепла, выделившееся при ударе.