

где I_0 – первоначальная интенсивность излучения, I – его интенсивность после прохождения через материал плотностью ρ и толщиной x , а μ – коэффициент, зависящий от материала. Более точно – поглощение определяется числом атомов в единице объема и пропорционально кубу атомного номера Z в таблице Менделеева. Таким образом, чем больше атомов на своем пути встретит рентгеновское излучение и чем больше электронов будет в оболочках этих атомов, тем больше вероятность поглощения фотона.

Вот почему в теле человека рентгеновские лучи сильнее всего поглощаются в костях, плотность которых относительно высока и в них много атомов кальция ($Z = 20$). При прохождении лучей через кость интенсивность излучения уменьшается вдвое через каждые 1,2 см. Кровь, мышцы, жир и желудочно-кишечный тракт гораздо меньше поглощают рентгеновское излучение (3,5 см уменьшают его вдвое). Ну, а меньше всего задерживает излучение воздух в легких (192 м уменьшают вдвое). Поэтому кости в рентгеновских лучах отбрасывают тень на фотопленку, и в этих местах она остается прозрачной (рис.85). В остальных местах, где лучам удалось засветить пленку, она делается темной. Это дает возможность врачам видеть пациента насквозь.

Если врачу необходимо увидеть желудок, то пациент выпивает раствор солей бария ($Z = 56$), которые сразу же становятся заметными на рентгеновском снимке, так как сильно поглощают излучение. Введение безвредных солей, содержащих атомы с высоким Z , используется также для того, чтобы сделать видимыми для рентгеновских лучей различные кровеносные сосуды человека.

В наше время рентгенологические исследования в большинстве случаев проходят без фотопленки, а прошедшее через пациента излучение делается ви-



Рис. 85. Снимок в X-лучах руки жены В.Рентгена с обручальным кольцом, показанный наряду с другими снимками в сообщении 28 декабря 1895 году об открытии X-лучей

димым с помощью специальных люминофоров. Этот метод, названный флюорографией, позволяет в несколько раз снизить интенсивность излучения при обследованиях и сделать его безопасным.

То что рентгеновское излучение сильнее поглощается более плотными предметами и тяжелыми атомами, делает его незаметным при различных видах досмотра. Так, просвечивание насквозь позволяет определить контуры предметов, сделанных из тяжелых металлов, например оружие или золотые изделия. Однако на просвет определить алмазы, наркотики или взрывчатку невозможно, так они практически не поглощают рентгеновское излучение.

Как рентгеновские лучи видят легкие атомы? Чем меньше заряд ядра атома, тем интенсивнее рентгеновские лучи передают электронам свою энергию. Другими словами, рентгеновское излучение обладает способностью рассеиваться в веществе, состоящем из легких атомов. Тяжелые атомы в большей степени поглощают рентгеновское излучение, чем рассеивают его, так как их электроны очень сильно связаны с ядром. Таким образом, материалы, содержащие только легкие элементы (например, водород, углерод, азот и кислород), часть рентгеновского излучения возвращают обратно, уменьшив его жесткость (увеличив длину волны). Этим пользуются для обнаружения взрывчатки или наркотиков, находящихся в металлическом ящике, или людей, спрятавшихся внутри контейнера (рис.86).

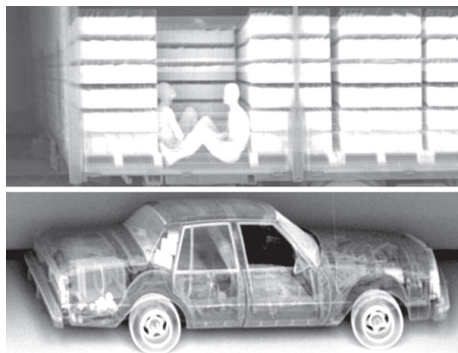


Рис. 86. Регистрация рассеянного рентгеновского излучения позволяет обнаруживать людей внутри металлического контейнера или упаковки с наркотиком, спрятанные в автомобиле

КАК ОКЕАНЫ ГОВОРЯТ ДРУГ С ДРУГОМ: ПОДВОДНАЯ АКУСТИКА

Почти вся информация об окружающем мире поступает к человеку в виде волн – электромагнитных (свет) и звуковых. Высокая скорость электромагнитных волн, возможность распространения в вакууме, а также относительно малый коэффициент их поглощения в воздухе сделали эти волны основным источником информации.

Вода – глушитель электромагнитных волн. К сожалению, как только человек спускается под воду, обо всех преимуществах электромагнитных волн ему можно забыть. Дело в том, что вода очень сильно поглощает электромагнитные волны, и поэтому пользоваться ими для связи уже невозможно. Например, интенсивность красной составляющей солнечного света с длиной волны 0,77 мкм, проходя в воде 1 м, ослабляется более чем в 10 раз. Причиной того, что электромагнитные волны так интенсивно поглощаются в воде, служит *полярная структура* ее молекул. Три атома, из которых состоит молекула воды, т.е. атом кислорода и два атома водорода, не находятся на одной прямой, а образуют равнобедренный треугольник с углом при вершине 105° , где находится атом кислорода. А так как кислород теснее притягивает к себе электроны, чем водород, то оказывается, что вблизи кислорода их концентрация больше, чем вблизи атомов водорода. Поэтому молекула воды является электрическим диполем с «минусом» около атома кислорода.

Известно, что диполи стараются ориентироваться антипараллельно напряженности внешнего электрического поля, минимизируя потенциальную энергию взаимодействия с ним. А если внешнее поле переменное, то диполи непрерывно поворачиваются «туда-сюда», следуя за изменениями полярности поля. Энергия для поддержания таких крутильных колебаний диполей воды берется из энергии внешнего поля. Крутящиеся под действием внешнего поля молекулы «трутся» о соседей, и большая часть этой энергии превращается в тепло. Поэтому энергия электромагнитных колебаний при распространении в воде быстро поглощается, переходя в тепловую. Способностью воды превращать энергию электромагнитных волн в тепло пользуются все те, у кого дома есть микроволновые (или СВЧ) печи,

частота колебаний в которых составляет около 2,45 ГГц (длина волны 12 см).

Звуководы под водой. Сильное поглощение водой электромагнитных волн делает использование звуковых волн для подводной связи единственным выбором для человека и животных. Изучением распространения звука под водой начали серьезно заниматься во время второй мировой войны. Одновременно в США и в СССР исследовали, как далеко распространяется звуковая волна от подводного взрыва. Оказалось, что, вопреки теоретическим расчетам, звук от взрыва 500-граммовой тротиловой пашки можно зарегистрировать на расстоянии более 3000 км. Объяснить такое малое затухание акустического сигнала можно было, предположив, что звуковые колебания каким-то образом фокусируются под водой и далее с минимальными потерями проходят тысячи километров по некоему «звуководу».

Материалы по подводным звуковым каналам долгое время оставались засекреченными. Были созданы целые системы прибрежных и океанских гидроакустических антенн из подводных микрофонов (гидрофонов) с записывающими устройствами на берегу и на военных кораблях. Это позволяло слышать шумы подводных лодок, находящихся практически в любой точке мирового океана, и даже определять их тип по спектру шума. Одновременно оказалось, что в океане множество звуков: шумы волн, голоса китов и дельфинов, шумы от извержения подводных вулканов и от косяков рыб. После окончания холодной войны, в конце 1990-х годов, многие работы по гидроакустике рассекретили, и ученые получили возможность более свободно изучать происхождение подводных шумов.

Как происходит фокусировка звука под водой? Обсудим, что заставляет звук распространяться по звуководу. Из оптики известно, что стеклянная линза фокусирует параллельный пучок света потому, что скорость распространения света в линзе меньше, чем в воздухе. Свет может распространяться по световоду на большие расстояния тоже из-за того, что скорость распространения света в сердцевине волокна меньше, чем в оболочке. Точно так же можно объяснить и существование подводных звуковых каналов. На какой-то глубине в океане скорость распространения звука минимальна, что и «тянет» звук на эту глубину. Звук, как и все колебания, «ленивый» и всегда ищет такой путь, который можно пройти с минимальной скоростью. Но почему скорость звука в воде не постоянна? От чего она зависит?

Звук – это распространение волн сжатий и разрежений через

среду. Дрожащий камертон, опущенный в воду, начинает ритмически перемещать соседние молекулы воды, те – своих соседей и так далее. Так зарождаются все звуковые волны. Чем массивнее частичка среды, тем тяжелее ее сдвинуть и тем меньше будет скорость распространения звука в этой среде. А значит, скорость распространения звука в среде должна быть пропорциональна величине, обратной ее плотности.

Вторая характеристика среды, от которой зависит скорость звука, ее сжимаемость. Представьте себе несколько одинаковых шаров на поверхности стола, расположенных по прямой линии на одном и том же расстоянии друг от друга. Возьмем еще один шар (1) и толкнем его вдоль этой прямой, чтобы он абсолютно упруго ударился в крайний из покоящихся шаров (2). Оба столкнувшихся шара начнут деформироваться, и при этом ранее покоившийся шар 2 будет постепенно ускоряться, а шар 1 – замедляться. В конце концов, когда столкновение закончится, шар 1 остановится, а шар 2 продолжит путь с той же скоростью к шару 3. Очевидно, что задержка при передаче скорости от шара 1 к шару 2 равна времени, необходимому для деформации шаров, а последнее будет тем меньше, чем более жесткими будут шары. Значит, скорость распространения волны деформации от шара к шару пропорциональна жесткости материала, из которого эти шары сделаны. То же можно сказать и о звуке, скорость распространения которого должна быть пропорциональна жесткости среды, характеризуемой модулем Юнга E .

Итак, простые рассуждения привели нас к выводу о том, что скорость звука в воде должна быть пропорциональна ее жесткости и величине, обратной ее плотности. Попробуем найти формулу для скорости звука, используя теорию размерностей. Считая, что размерность жесткости есть $[E] = \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$, плотности – $[\rho] = \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а скорости звука – $[v] = \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, получаем следующую формулу для скорости звука в воде:

$$v = \alpha \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где α – постоянный коэффициент, величину которого нельзя вычислить из теории размерностей. Подставляя в эту формулу табличные данные для воды $E = 2,2 \cdot 10^9$ Па и $\rho = 1000$ кг/м³ и считая, что $\alpha = 1$, получаем $v = 1483$ м/с – очень близко к табличной скорости звука в воде для 20 °С. Это значит, что коэффициент α действительно равен единице, и мы вывели верную формулу.

Ну а теперь, чтобы ответить на вопрос, почему существует подводный звуковой канал, вернемся к зависимости скорости звука от глубины. Сначала подумаем, какие свойства морской воды могут изменяться с глубиной. Первое, что приходит в голову, — вода с глубиной становится более холодной. Из рисунка 87 видно, что в тропических широтах температура воды при погружении резко уменьшается от 23°C на поверхности океана до 5°C на глубине 1,5 км. Это резкое изменение температуры называют *термоклин*ом. Его характеристики изменяются в зависимости от сезона, становясь особенно резкими в жаркую погоду. При дальнейшем погружении температура довольно медленно уменьшается, достигая $2 - 3^{\circ}\text{C}$ на глубине 4,5 км, где остается неизменной круглый год.

Известно, что вода при нагревании расширяется, а ее плотность уменьшается. Так как уменьшение плотности должно приводить к росту скорости звука (около 3 м/с при нагревании на 1°C), то это значит, что вблизи поверхности океана скорость звука должна быть максимальна, если на нее не действуют никакие другие факторы (рис.88). Однако с глубиной не только понижается температура морской воды, но и увеличивается ее давление. Увеличение давления делает воду менее сжимаемой (более жесткой), значит, скорость звука с глубиной должна

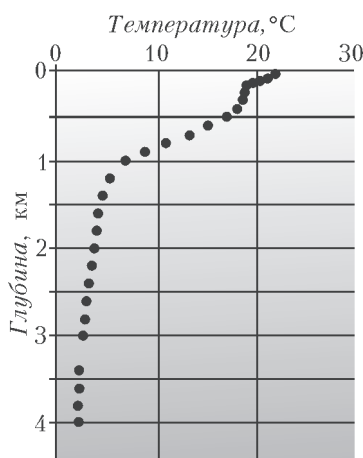


Рис. 87. Зависимость температуры морской воды в тропических широтах от глубины

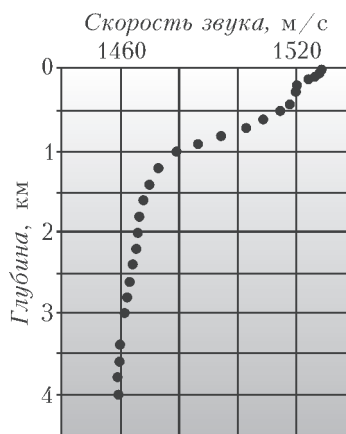


Рис. 88. Зависимость скорости звука в воде от глубины, если учитывать только изменение температуры

увеличиваться. Если бы увеличение давления с глубиной было единственным фактором, изменяющим скорость звука, то она линейно росла бы с глубиной (15 м/с на 1 км погружения) так, как это изображено на рисунке 89.

Учитывая сразу оба фактора – температуру и давление, можно получить реальную зависимость скорости звука от глубины, «перемножив» кривые, показанные на рисунках 88 и 89. Из рисунка 90 видно, что реальная зависимость скорости звука имеет минимум на глубине около 1 км. Это означает, что первоначальное уменьшение скорости звука с глубиной связано с резким уменьшением температуры (термоклин), а последующий рост скорости звука при погружении – с ростом давления.

Постепенное увеличение солёности воды с глубиной (на поверхности солёность воды 3,4%, а вблизи дна – 3,5%) вносит незначительный вклад в зависимость скорости звука от глубины далеко от берега. Однако вблизи берега, где солёность воды (а вместе с ней и её плотность) может изменяться в широких пределах из-за впадения пресных рек, положение минимума скорости зависит также и от этого фактора.

Итак, область с минимальной скоростью звука, находящаяся на глубине около 1 км, и является тем звуководом, который способен передавать звуковые волны на тысячекилометровые расстояния.

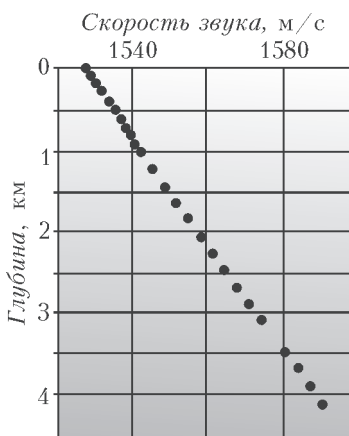


Рис. 89. Изменение скорости звука в воде с глубиной, если учитывать только рост давления с глубиной

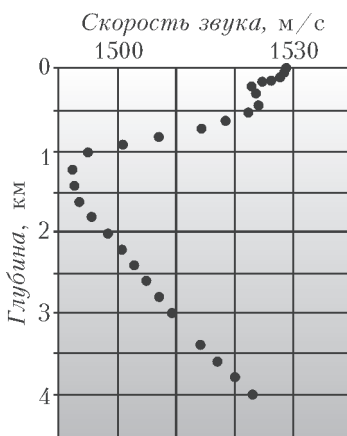


Рис. 90. Реальная зависимость скорости звука от глубины при учете соответствующих изменений температуры и давления

ЗАКОНЫ НЬЮТОНА ДЛЯ ПАНИКУЮЩЕЙ ТОЛПЫ

Паника – это чувство страха, которое, охватывая сначала небольшую группу людей, затем передается остальным, перерастая в неуправляемый процесс. Природа человека такова, что часто в экстренных ситуациях каждый человек ведет себя так же, как и все вокруг. Именно поэтому коллектив людей, обьятых паникой, по существу перестает быть коллективом, теряет его признаки, становясь неуправляемой толпой.

История хранит много примеров того, к каким человеческим трагедиям приводила паника толпы. Одна из них – Ходынская катастрофа, или просто «Ходынка» – произошла на северо-западе Москвы во время народного гулянья 18 мая 1896 года в дни коронации императора Николая II. По традиции, народ, присутствующий при коронации нового царя, всегда одаривали подарками. А в тот раз ходили слухи, что подарки будут очень дорогими. (На самом деле, подарочный набор включал в себя завязанные в платок булку, пряник, колбасу, немного сушеных фруктов и орехов, а также эмалированную – в то время большая диковинка – кружку с императорскими вензелями. С этой кружкой можно было подойти к многочисленным крамам с пивом и медовухой.) Поэтому привлеченная бесплатными гостинцами и зрелищами публика начала стекаться к Ходынскому полю еще с вечера, а к рассвету, когда число страждущих увеличилось до полумиллиона, если не более, прошел слух, что буфетчики начали оделять «своих» и что припасенного на всех не хватит. По свидетельству очевидцев, толпа вдруг вскочила, как один человек, и бросилась вперед, как будто от пожара. Между тем, местность, на которой были выстроены 150 будок с подарками и 10 пивных павильонов, была отделена от страждущих огромным оврагом (3 метра в глубину и 30 в ширину), откуда муниципальные службы обычно брали песок, необходимый для содержания в порядке московских улиц. В ответ на летевшие со всех сторон требования начать раздачу гостинцев растерявшиеся буфетчики принялись швырять узелки в толпу наугад – и тут началось самое страшное. Киоски брали штурмом, задние ряды напирала на средние... Произошла давка, в которой погибли, по официальным данным, 1389 человек и около 1300

получили увечья. По свидетельству А.С.Суворина, кружка из подарочного набора стоила 10 копеек, и на 5 копеек было гостинцев – вот и вся стоимость подарка, за который столько людей заплатили жизнью. Для очистки совести Николай II распорядился выплатить каждой семье погибших по 1000 рублей.

Кстати сказать, и в других странах случалось подобное. Так, в 1867 году, когда в Британии отмечали 50-летие вступления на трон королевы Виктории, в Лондоне при схожих обстоятельствах погибли около 4000 человек – и ничего, придворные церемонии не были нарушены.

Можно ли избежать давки? Конечно, да! Но прежде чем давать конкретные советы, посмотрим, как возникает давка, используя для этого методы физики сложных систем – раздела физики, изучающего системы, состоящие из большого числа объектов, взаимодействие между которыми подчиняется каким-либо определенным законам. Такими объектами могут быть атомы, молекулы или песчинки, образующие дюны, а также, люди, механически взаимодействующие друг с другом в толпе.

Какие силы действуют на человека в толпе. В соответствии со вторым законом Ньютона, для того чтобы предсказать поведение толпы через интервал времени Δt , необходимо знать положение и скорость каждого человека и силы, действующие на него в данный момент t . Другими словами, нам необходимо написать соответствующие уравнения для всех членов толпы, а потом решить эту систему уравнений.

Сначала перенумеруем всех людей в толпе, состоящей из N человек, выберем человека под номером i и рассмотрим силы, действующие на него. Очевидно, что одна из сил, заставляющих человека i двигаться, это горизонтальная проекция силы реакции опоры, т.е. земли, отталкиваясь от которой он и движется в избранном направлении. Обозначим эту силу $\overrightarrow{F_{zi}}$. Наталкиваясь на препятствия, которыми могут быть и остальные люди из толпы, человек i испытывает на себе действие силы сопротивления, которую мы обозначим $\overrightarrow{F_{ci}}$. Таким образом, если допустить, что все люди в толпе имеют одну и ту же массу m , например 80 кг, то уравнение второго закона Ньютона для i -го человека толпы принимает вид

$$m \frac{\Delta \vec{v}_i}{\Delta t} = \overrightarrow{F_{zi}} + \overrightarrow{F_{ci}},$$

где $\overrightarrow{\Delta v_i}$ – изменение скорости i -го человека, произошедшее за

интервал времени Δt в результате действия сил, стоящих в правой части уравнения.

Теперь займемся каждой из упомянутых сил. Рассмотрим сначала, чем руководствуется каждый из нас, оказавшись в толпе одержимых идти куда-то. Пусть, например, все стремятся выйти из помещения, где начался пожар. Тогда, очевидно, вектор силы $\overline{F_{3i}}$ будет направлен к ближайшей двери, а абсолютная величина F_{3i} будет зависеть от того, насколько человек удовлетворен своей скоростью движения в сторону заветной двери. Иными словами, $\overline{F_{3i}}$ можно считать пропорциональной разности между «желаемой» для данного человека скоростью движения $\overline{v_{0i}}$ и настоящим ее значением $\overline{v_i}$. Это предположение позволяет записать следующее соотношение для $\overline{F_{3i}}$:

$$\overline{F_{3i}} = m \frac{\overline{v_{0i}} - \overline{v_i}}{\tau},$$

где τ – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность времени, который сопоставим с интервалом, необходимым человеку для разгона до «желаемой» скорости (пусть, например, $\tau = 0,5$ с). Нетрудно догадаться, что вектор $\overline{v_{0i}}$ всегда направлен в сторону двери, а его абсолютная величина характеризует стремление охваченного паникой человека выбраться из горящего помещения. Каждому человеку кажется, что чем больше будет значение v_{0i} , тем раньше он выберется оттуда. Таким образом, v_{0i} может служить мерой паники в толпе.

После того как с помощью формулы описана сила, влекущая i -го человека к двери, рассмотрим силы его взаимодействия с препятствиями, встречающимися на пути. Очевидно, что даже в условиях паники человек предпочитает не подходить вплотную к впереди идущему, если, конечно, его не толкают в спину сзади. Такое нежелание находиться очень близко к другим людям эквивалентно существованию некой силы отталкивания между людьми, которая возрастает с уменьшением расстояния между ними, аналогично кулоновской силе взаимодействия одноименных зарядов. Для простоты последующих вычислений можно считать, что на i -го человека со стороны j -го человека действует отталкивающая сила, абсолютное значение которой равно

$$F_{ij} = Ae^{\frac{|\overline{z_i} - \overline{z_j}| - D}{B}},$$

где D – поперечный размер человека, пусть $D = 0,6$ м, A и B – постоянные, равные 2000 Н и 0,08 м соответственно, а вертикаль-