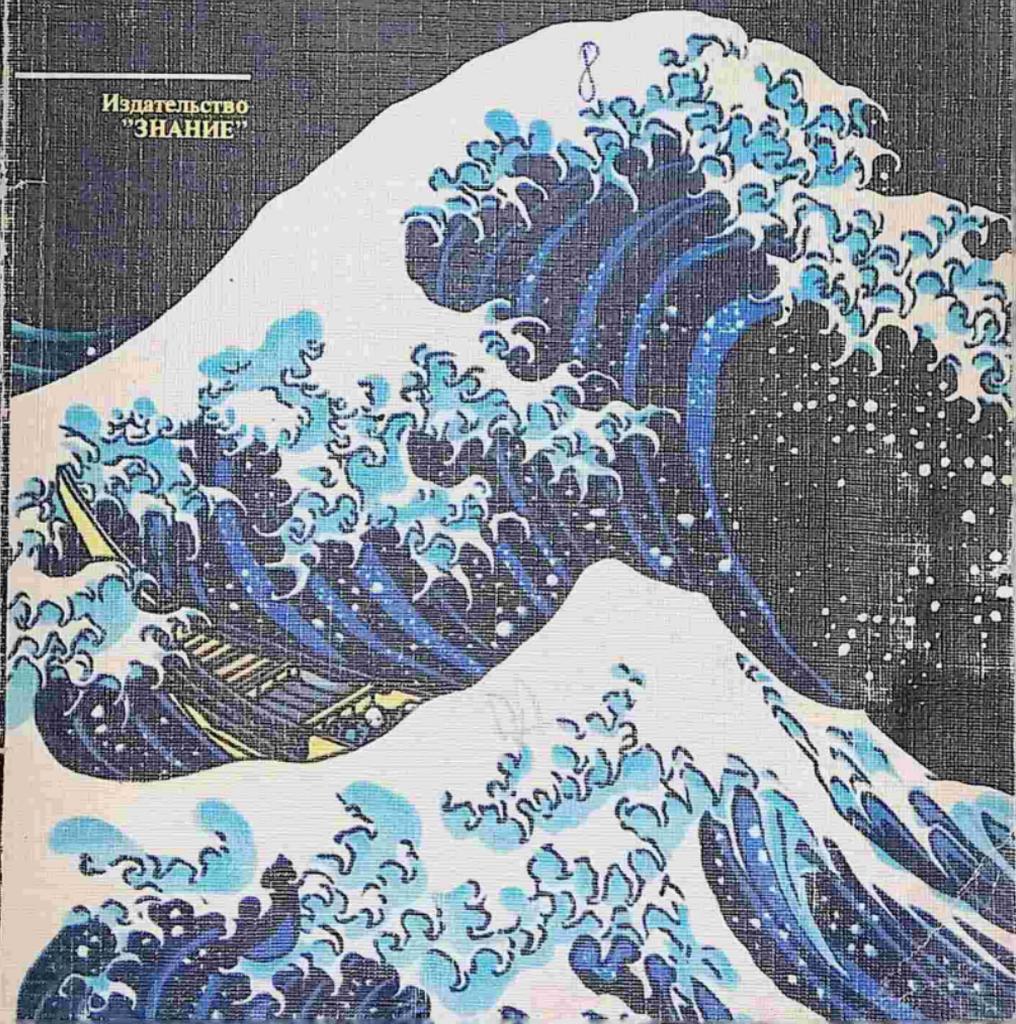
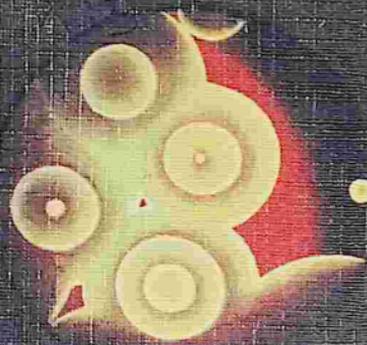


*Б.Б. Кадомцев
В.И. Рыдник*

ВОЛНЫ ВОКРУГ НАС

Издательство
"ЗНАНИЕ"



22.3
к 13

Б.Б. Кадомцев,
В.И. Рыдник

ВОЛНЫ ВОКРУГ НАС

186998



01

Издательство
"ЗНАНИЕ"
Москва
1981

ББК 22.3

К 13

Кадомцев Б. Б., Рыдник В. И.

К 13 Волны вокруг нас. — М.: Знание, 1981. — 152 с., ил.

40 к.

80 000 экз.

Представление о волнах, пожалуй, одно из самых древних наших представлений. Оно возникло из наблюдений за волнами на поверхности воды и в последующем стало простым и обыденным для подавляющего большинства людей. Между тем физика волн на воде, которая начала развиваться три века назад, показала, что за этой обыденной простотой скрывается очень большая сложность, не до конца понятая и по сей день.

Популярному изложению увлекательной физики волн (от волн на воде до «волн» в транспортных потоках) посвящена эта книга.

Для широкого круга читателей.

К $\frac{20400-026}{073(02)-81}$ 8-81 1903040000

ББК 22.3
53

Когда авторы решили писать эту книгу, между ними состоялся такой разговор. Мы решили привести его, потому что он может дать определенное представление о намерениях авторов.

1-й автор. Мне кажется, что тема «волны вокруг нас» может заинтересовать широкого читателя. Волны в самом деле окружают нас. Глаз воспринимает световые волны, кожа — инфракрасные и ультрафиолетовые, ухо — звуковые волны. Ученые в лабораториях, где занимаются проблемой получения управляемых термоядерных реакций, изучают волны в плазме.

2-й автор. Вы забыли упомянуть еще самые что ни на есть привычные волны на поверхности воды.

1-й автор. Да-да, еще и они.

2-й автор. Получается что-то необъятное. Вспоминается знаменитый афоризм, кстати, принадлежащий автору, чьи слова мы решили взять эпиграфом к введению. Он гласит: «Нельзя объять необъятное». Надо разумно ограничить себя.

1-й автор. Согласен. Но чем ограничиться?

2-й автор. Пусть это будут волны, непосредственно видимые глазом. Как ни странно, на эту тему мало популярных книг. Под «непосредственно видимыми глазом» я разумею, конечно, не световые волны, а волны на воде, на песке и тому подобные.

1-й автор. Но это же очень привычные нам волны, мы замечаем их чуть ли не каждый день. Как можно заинтересовать читателя привычным?

2-й автор. Да, это действительно трудно. Интерес может появиться, когда мы попытаемся объяснить физику этих явлений, показать, что под покровом привычного таится очень большая сложность.

1-й автор. Час от часу не легче. Вместо неинтересного привычного мы предлагаем читателю еще менее интересное для него сложное. Насколько я понимал до сих пор, научно-популярные книги пишутся для того, чтобы сделать для читателя сложное понятным, привычным. Мы же собираемся идти в обратном направлении.

2-й автор. А почему бы и нет? Сама природа не проста и не сложна. Простым или сложным может быть понимание тех явлений, которые в ней происходят. И вот что интересно: чем сложнее те понятия, с которыми мы работаем, описывая явления, тем проще получается их картина.

1-й автор. Ну что же, это в общем понятно. Когда-то разнообразие всех явлений, в которых участвует свет, казалось людям ужасающе сложным. Оно немного упростилось, когда пришло понимание, что свет — это волна наподобие волны на

воде. И радикально упростилось, когда возникло понятие о свете как об электромагнитной волне. Но, согласитесь, понятие об электромагнитной волне куда сложнее, чем представление о граде световых частиц или о дожде световых капель, — таким представлением, как известно, пользовался еще Ньютон.

2-й автор. Да, конечно. Но вы говорите: казалась людям. Лучше сказать: немногочисленным представителям племени людского, ученым. А потом это знание благодаря учебникам и популярным книгам начало становиться достоянием остального человечества. С волнами на воде произошло то же самое, с той лишь разницей, что люди никогда не задумываются над сложностями привычного. Мы не можем остановиться только на показе этой сложности. Мы должны объяснить, откуда возникает эта сложность, и попытаться упростить ее. Для этого нам и понадобятся более сложные понятия.

1-й автор. Да, это тем более необходимо, что из школьного курса физики, к сожалению, никак не создается представления о том, что волновое движение очень сложно, а случаи, когда оно происходит достаточно просто, чтобы попасть в школьные учебники, можно действительно пересчитать по пальцам.

2-й автор. Вот-вот. Я думаю, что для любознательных в этой немножко неожиданной сложности заключен немалый интерес. А популярные книги-то и пишутся для любознательных.

1-й автор. Значит, решили: будем писать об «очевидном — невероятном», а лучше сказать, об «очевидном — невероятно сложном». Не отпугнем ли мы читателя этим? Может быть, не надо было бы писать такого предисловия?

2-й автор. Нет-нет, читателя надо честно предупредить о том, что мы собираемся делать. И потом ведь мы будем вести разговор на языке, вполне понятном читателю со средним образованием. Кстати, о математике: совсем без нее нельзя обойтись.

1-й автор. Конечно, поскольку те физические понятия, которые мы будем вводить и объяснять, предназначены не только и не столько для описания качественной картины волн, сколько для расчетов. Физика — точная, а лучше сказать, «почти точная» наука, конечная ее цель — довести описание до числа. Значит, без математики, увы, не обойтись.

2-й автор. Почему «увы»? Это хорошо, это позволит нам кое-где избежать слишком многословных пояснений. Но, конечно, никаких сложных уравнений, никаких изощренных методов их решения мы писать не будем — только самые простые, пускай даже приблизительные формулы и геометрические чертежи. Не будем забывать, что наша книга — все же в большей степени о физике, а не о математике волн. Кстати, не надо думать, что известные математические способы описания волн слишком сложны, напротив, они недостаточно сложны, ибо не позволяют и по сей день до конца решить многие проблемы, связанные с волнами.

1-й автор. Значит, книга в большей мере о физических идеях, их развитии, а не о математических расчетах? Согласен. Но писать будет очень трудно.

2-й автор. А когда писать популярные книги было просто? Авторы таких книг всегда находятся между Сциллой и Харибдой: либо точно, но непонятно, либо понятно, но неточно. Очень трудно сделать настоящую популярную книгу, чтобы в ней все было и в достаточной мере понятно, и вместе с тем не слишком неточно. Речь идет не о математической неточности — абсолютно точных в математическом отношении физических теорий вообще не существует. Речь идет об объяснении физических понятий.

1-й автор. И еще вот что. Мы должны предупредить читателей, что даже более узкая тема «волны, непосредственно видимые глазом», тоже необъятно широка. В скромных рамках нашей книги нам удастся описать только важнейшие волновые явления. Я думаю, что мы должны ограничиться лишь описанием приливов, морских волн от землетрясений, ветровых волн и их разрушения у берегов, волн, вызываемых движением кораблей.

2-й автор. Я бы этот список немного расширил. Не менее интересны волны, которые мы наблюдаем на песке или на снегу. Или, скажем, волны в потоке автомобилей, в живых организмах и даже в целых галактиках. Тем более, насколько я знаю, систематизированное объяснение этих волн в популярных книгах еще не появлялось.

1-й автор. Ладно, согласен, это действительно интересно. Но пусть это будет все. А если читатели встретят за установленными нами пределами другие интересные «видимые» явления и не смогут их объяснить, то, я думаю, мы будем готовы им помочь.

Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые; иначе такое бросание будет пустою забавою.

Козьма Прутков

Волны — кто с ними не знаком? Они — одно из природных явлений, издревле известных человеку. Многие древние государства возникали на прибрежных территориях — Финикия, Египет, Греция, Рим... В близкие уже нам времена на берегу моря появились Англия, Франция, Италия... Представления людей далекого прошлого о волнах вряд ли сильно отличались от наших. Представления, но не понятия.

Попробуем выразить словами то, что связывается у нас с образом волны. Конечно, это будет образ морской волны: нечто бегущее и притом регулярное, повторяющееся в пространстве и времени.

Всегда можно заметить, что одна волна, пусть хоть немножко, но чем-то отличается от другой. Однако мы без малейшего труда представляем себе очень длинный ряд следующих друг за другом совершенно одинаковых волн. Отсюда, конечно, рождается и представление о сплошности, непрерывности среды, в которой возникают и движутся волны. Разумеется, все теперь знают, что вода, как и все среды на свете, состоит из частиц. Но в волновом движении частиц этого не ощущается, вода выступает как нечто целое, быть может, до того мгновения, когда волны, обрушиваясь на берег, разбиваются на отдельные брызги.

Регулярное, повторяющееся в пространстве и времени движение... Известно много таких движений отдельных тел и отдельных их частей: обращение планет вокруг Земли и Солнца, ходьба и бег животных и человека, раскачивание подвешенных предметов. Перечень вращательных и колебательных движений можно еще долго продолжать. Но все-таки это не волновое движение. Не хватает еще одного штриха — «бегущего» движения сплошной текучей среды. Именно благодаря текучести среда может изменять свою форму, по ней могут перемещаться волны.

Что такое текучесть? Это большая взаимная подвижность частиц, образующих среду.

При первом взгляде на волну почти наверняка покажется, что частицы среды движутся, текут вместе с волнами. Однако это первое мнение вовсе не всегда правильно. Волна бежит, а частицы среды остаются практически на своих местах. Корабли в гавани, чайки, сидящие на воде, кусочки дерева — все они качаются на волнах, не приближаясь к берегу и не удаляясь от него.

Более внимательное наблюдение показывает, однако, что их движение сложнее: они не просто качаются вверх-вниз. Когда под ними проходит гребень волны, они поднимаются на нем, несколько смещаются вперед, а затем соскальзывают на ложбину волны, подаваясь назад. Получается некое замкнутое, вращательное движение. Если опуститься под воду, то можно заметить, что такое же движение совершают верхушки водорослей неподалеку от поверхности воды. Может быть, водоросли движутся так потому, что они прикреплены ко дну, а корабли — потому, что они стоят на якоре? Однако чайки и щепки на волнах не заякорены, а между тем совершают такое же движение.

Значит, в среднем за один цикл движения от прохождения одного гребня волны до другого плавающие на воде или слегка погруженные в нее предметы никуда систематически не перемещаются? И это все же не так. Если набраться терпения, то можно заметить, что не прикрепленные к дну предметы, хоть и очень медленно, но смещаются вдоль хода волны даже при полном безветрии и невысоких волнах. О высоких волнах и говорить не приходится: все «дары моря», в которых с таким увлечением роются прибрежные жители и курортники, выброшены на берег именно волнами.

Волны на воде возникают с необычайной легкостью. Поверхность воды никогда не бывает абсолютно спокойной. Поверхность, о которой говорят, что она зеркально гладкая, — это недостижимый идеал. Внимательно посмотрите на поверхность пруда в безветренную погоду. Если на противоположном берегу пруда стоит прекрасный старинный замок, то вы увидите, что его вертикальные контуры действительно отражаются чрезвычайно четко, а вот горизонтальные хоть чуточку, но обязательно будут размыты. В этом виноваты очень мелкие волны, которые подчас даже трудно заметить. И столь же трудно бывает угадать причину их возникновения — ведь поверхность воды постоянно подвержена каким-либо воздействиям. Нам, например, только кажется, что в безветренную погоду воздух неподвижен. На самом деле он все время в движении.

И уж, конечно, мы видим волны, когда по воде идет корабль или дует сильный ветер. Взволнованная поверхность воды кажется настолько естественной и очевидной, что мы всегда обращаем внимание, когда она становится очень гладкой.

А какое разнообразие волн! Круги от брошенного камня, длинная вереница волн мертвой зыби у морского берега, «усы» и крутые поперечные волны, бегущие за прошедшим катером, грозные и все время меняющие свой вид штормовые валы. За волнами можно наблюдать бесконечно, это зрелище никогда не приедается. Часто оно приводит нас в такое безмятежное состояние, когда не то что исследовать волны — и думать даже не хочется.

А все-таки, конечно, человеку думать о волнах приходи-

лось — и в море, и на берегу. Море кормило целые народы, а бывало, и обрушивало на них всю мощь своего гнева. В преданиях многих народов живет легенда о всемирном потопе. Вряд ли она плод одной лишь фантазии. Очень странно, что все сказания описывают эту катастрофу примерно одинаково и относятся, насколько можно судить, примерно к одному и тому же времени. Конечно, потоп не был вызван наводнением из-за того, что «сто дней и ночей» лил дождь: таких «всемирных» дождей не бывает. Скорее всего потоп могла вызвать гигантская волна, возникшая при катастрофическом землетрясении в океане. Сегодня все знают о чудовищных разрушениях, которые вызывает на побережье цунами.

Древние жители морских берегов знали и о приливах и отливах, периодически повторяющихся при движениях Луны и Солнца. Первые мореплаватели, несмотря на изменчивый и прихотливый нрав морских волн, прекрасно знали о существовании особо высоких и опасных групп штормовых волн («девятым вале»), разделенных промежутками сравнительно невысокого волнения. Знали они и о том, как нарастают длина и крутизна волн по мере развития шторма, а с их ростом — и разрушительная сила волн. На основе этого тысячелетнего знания, огромного и очень часто печального опыта выработывались навыки уверенного мореплавания, создавались наилучшие по тем временам формы кораблей и конструкции сооружений, защищающих от волн морские порты.

Люди ходили по морям в далекие страны, испытывали милость и гнев волн, возвращались домой и рассказывали об исполинских валах, о бухтах, в которых можно было укрываться от волн. Это была не только первая география, это была еще и первая, эмпирическая физика волн.

А затем примерно на пороге XVII века пришло время количественной физики. Волны стали систематически наблюдать, устанавливать закономерности их возникновения, развития и движения. Этого требовала эпоха великих географических открытий. Тогда почти все географические открытия делались отважными мореплавателями. (А сегодняшние находки говорят о том, что скорее всего эти открытия были сделаны гораздо раньше: например, Америку открыли викинги еще за пять веков до Колумба.)

Исаак Ньютон заложил основы механики движения частиц и «заодно» объяснил — уже вполне научно — происхождение приливов. Прошло меньше века, и законы Ньютона были перенесены с движений частиц и твердых тел на движение жидкостей и плавающих на них предметов. Первыми это сделали Даниил Бернулли и Леонард Эйлер в середине XVIII века, и от них ведет начало наука «о движении воды» — гидродинамика. Еще спустя полвека появилась первая теория волн на воде, созданная французскими учеными Коши и Пуассоном.

XIX век принес новые крупные успехи в изучении волн. Вол-

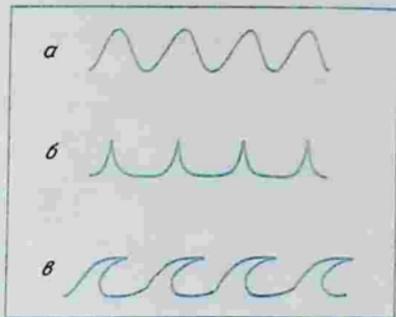


Рис. 1. Образы волн: а — «идеальная» волна; б — «реальная» волна вдали от берега; в — «реальная» волна возле берега

ны стали изучать в экспериментах, поставленных в специальных бассейнах. Английский инженер Рассел в 30-х годах провел многочисленные измерения скорости распространения волн в каналах. Английские физики Стокс и Рэлей разработали теорию волн на воде. Благодаря этим работам лидерство в изучении волн на воде надолго перешло к Англии. Лишь в конце XIX века его начали оспаривать ученые других стран, среди них в первую очередь русские.

Все исследователи физики волн были замечательными математиками. Это не случайно. Эксперимент с волнами на поверхности воды никогда не требовал изощренной исследовательской техники. Он и сегодня остается сравнительно простым, если вспомнить о гигантских и вместе с тем чувствительнейших установках, на которых изучают элементарные частицы, атомные ядра, плазму и многие другие физические объекты. Но вот математика волн, она с самого своего начала оказалась на редкость сложной, более того, все время продолжала и по сей день продолжает усложняться. Она стала настолько трудной, что приходится использовать всю мощь вычислительного аппарата, чтобы хоть отчасти обойти эти трудности и довести решение задач до конца, до числа, как говорят физики.

Из разнообразия волн, которые мы наблюдаем в природе, ясно, что геометрический образ волны может быть весьма различным. Попросите ребенка нарисовать волны и кораблик, он нарисует скорее всего правильную волнообразную линию (рис. 1). Он, конечно, не знает, как она называется по-научному. Люди постарше, пожалуй, знают: она называется синусоидой.

Но вот попросили сына рыбака нарисовать такую же картинку, и он сразу же деловито осведомился: какую волну нарисовать — ту, что в море, или ту, что у берега? Он нарисовал обе — морскую волну, но не в виде плавной кривой, а в виде линии с заостренными горбами и пологими западинами, и прибрежную волну с загибающимися вперед гребнями.

Юный художник изобразил два типичных вида морских волн. Однако уже эти два геометрических образа морских волн оказываются очень трудными для математического описания.

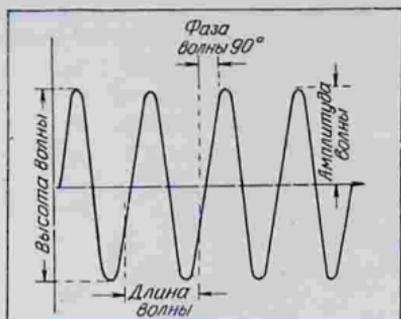


Рис. 2. Характеристики синусоидальной волны

Еще более трудна в математическом отношении кинематика волн на воде, иными словами, закономерности их распространения от своего источника. И совсем уже трудна динамика волн — расчет сил, которые вызывают появление и развитие волн, определяют саму механику их движения и вдали от берегов, и вблизи берега, и при встрече с подводными и надводными препятствиями.

Математика здесь настолько сложна, что, как правило, расчеты приходится дополнять моделированием. Ставят эксперименты на небольших моделях, имитирующих реальные условия в природе, иначе результаты не удастся получить в численном виде.

Мы не последуем за математиками по этому пути: он слишком крут и труден. Но простейшие характеристики волн все же напомним. Начнем с синусоиды. Чисто синусоидальные волны в природе не встречаются, но синусоида — неплохая модель для пояснения основных понятий о волнах.

Изобразим на графике достаточно длинную синусоиду, скажем, из четырех одинаковых горбов и впадин (рис. 2). (Если горбы и впадины не будут одинаковой высоты и глубины или будут отстоять друг от друга на разных расстояниях, то кривая, хотя и сохранит волнистый характер, уже не будет синусоидой.) У синусоиды есть два измерения — по высоте и по длине. Все мыслимые синусоиды отличаются друг от друга только этими двумя измерениями. Первое из них — высота вершин над осью абсцисс (или такая же глубина впадин под осью абсцисс). Второе — расстояние между любой парой соответственных точек, например между двумя соседними горбами или впадинами. Первое называется амплитудой волны, а второе — длиной волны. Часто говорят еще о высоте волны: это двойная амплитуда, полный размах синусоиды от вершины до нижней точки впадины.

Волной, строго говоря, называют только кусок синусоиды, содержащий один горб и одну впадину. Всю синусоиду в целом характеризуют как цуг волн. Действительно, волны на синусоиде следуют одна за другой цугом, след в след.

Нередко используют еще одну характеристику волны, производную от уже названных. Это — отношение высоты волны к ее длине, естественно называемое крутизной волны.

Кроме горбов и впадин, на синусоиде есть и другие точки. В первую очередь это точки, лежащие на оси абсцисс. Их три для каждой волны (третья, собственно, находится на конце волны, а поскольку синусоида непрерывна, ее можно с полным основанием принять за начало следующей волны). Положение любой другой точки на всей синусоиде или на какой-либо одной волне можно отсчитывать от любой из точек. Для удобства это делают от нуля, то есть от точки на оси абсцисс. От какой — тоже безразлично, лишь бы она была фиксирована, сидела на месте.

Расстояние любой точки волны от нулевой точки называется фазой волны. Это расстояние можно отсчитывать в единицах длины, а можно и в угловых единицах. Приведем простейший пример синусоиды из физики. Если поставить стерженек на столик, вращающийся в горизонтальной плоскости, то его проекция на вертикальный экран будет иметь вид точки, бегающей по прямой туда и обратно. Приведем экран в движение вверх и закроем его фотопластинкой. Тогда после проявления на ней появится синусоида. При этом волна получится за один оборот шарика, то есть при его повороте на 360° . Отсюда понятно, что расстояние от нуля до гребня синусоиды 90° , расстояние до точки, где синусоида начинает переворачиваться, уходя под ось абсцисс, 180° и так далее.

Ну вот, теперь с геометрией синусоиды покончено и можно переходить к кинематике. Заставим синусоиду двигаться слева направо. Для удобства будем считать, что из начала координат, как из клубка ниток, разматываются все новые волны, а на правом обрезе графика волны исчезают. Чтобы не дать им исчезнуть бесследно, установим на правом обрезе некий приемник волн. Пусть он будет реагировать, например, только на приход к нему горбов волн и каждое такое событие отмечать щелчком. Число щелчков в единицу времени называют частотой волн. Наряду с частотой нередко используют обратную ей величину — период волн. Очевидно, период — это промежуток времени между приходом в приемник данного и следующего за ним горба, или, что то же самое, время прохождения одной волны через приемник.

Частота прихода горбов, естественно, зависит от того, на каком расстоянии друг от друга находятся горбы и с какой скоростью движется сам цуг волн. Частота будет тем выше, чем ближе горбы друг к другу, то есть чем меньше длина волны, и чем быстрее движется цуг волн. Так мы приходим в первую, пожалуй, самому простому волновому соотношению — между частотой ν , длиной волны λ и скоростью движения c_Φ :

$$\nu = \frac{c_\Phi}{\lambda} \quad (1)$$

Наш приемник, напомним, настроен на определенное и постоянное место в волне, а именно на ее вершину. Его можно настроить и так, чтобы он реагировал на приход впадины. Но греб и впадина — это определенные фазы волны. Значит, частота, которую регистрирует приемник, — это частота прихода определенных фаз волны. (Мы не случайно выбрали две точки, соответствующие именно этим фазам. При других фазах смещения точек волны от оси абсцисс повторяются за время прохода одной волны по два раза, а точек на самой оси абсцисс — даже четыре раза. Очевидно, для горба и впадины частота прихода просто будет наименьшей.) Поэтому и скорость, которая фигурирует в соотношении (1), имеет смысл скорости перемещения некоторой определенной фазы волны (например, фазы 90°). В соответствии с этим ее называют фазовой скоростью волны. Чтобы отметить это обстоятельство, мы приписали ей индекс «ф» (фазовая).

Замечательное свойство синусоидальной волны — ее «несгибаемый характер». Такая волна может постепенно ослабевать, распространяясь в среде, где поглощается ее энергия. Тогда только уменьшится высота ее горбов и глубина впадин. Эта волна может изменить свою длину, переходя из одной среды в другую, обладающую иными свойствами. Но при всех превратностях судьбы она останется синусоидой.

Однако такой «несгибаемостью» не обладают волны более сложной формы. Они могут менять форму, даже распространяясь в одной среде и в отсутствие поглощения их энергии. Это явление легко заметить, наблюдая, например, круги на воде от брошенного камня. Мы скоро займемся описанием того, что при этом происходит. Но сначала остановимся на очень важном открытии, сделанном в начале прошлого века французским математиком Фурье. Это открытие чрезвычайно облегчило изучение законов волнового движения.

Фурье установил, что любую кривую, даже имеющую очень сложную форму, можно разложить на совокупность разных синусоид. Если кривая имеет периодический характер, то есть повторяется в пространстве, то длины волн составляющих ее синусоид должны быть кратными друг другу; если она не периодична, то длины волн могут быть любыми. И наоборот, подбирая высоты, длины и фазы волн синусоид, можно сконструировать любую нужную кривую.

Понятно, что это означало для математики. Синусоида очень простая кривая, с ней легко работать. Сложение или разложение тоже в общем не слишком сложные операции. Вместо того чтобы мучиться со сложными и громоздкими формулами, описывая кривые и изменения их формы, достаточно установить, чему равны и как меняются высоты, длины и фазы отдельных составляющих синусоид.

Ничуть не меньше это значило для физики. Любое изменение формы сложной волны при ее движении тоже можно описать,

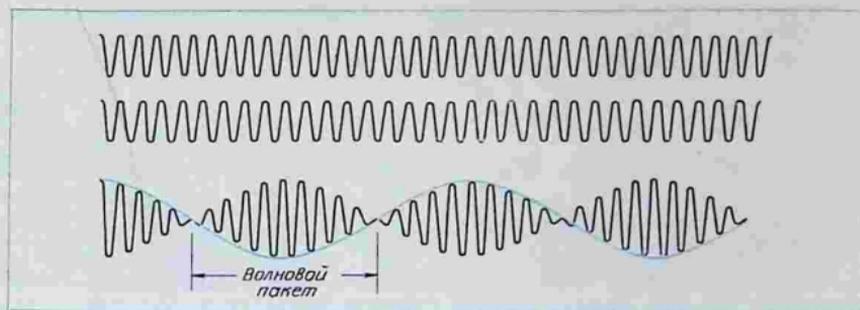


Рис. 3. Сложение двух синусоидальных волн с различными длинами волн и образование волновых пакетов

задавая или находя изменения характеристик простейших синусоидальных волн. Точно таким же способом можно описать и путешествие волны сложной формы, которая не меняется при движении.

Возьмем две синусоиды с несколько различными длинами волн и изобразим их одна под другой (рис. 3). Произведем их сложение от точки к точке; по-научному это называется суперпозицией. Складывать синусоиды будем не арифметически, а алгебраически: смещения точек вверх от оси абсцисс будем считать положительными, а вниз — отрицательными. Например, если горб придется против впадины, то в сумме, очевидно, должно получиться нулевое смещение. О таких точках волн говорят, что они «находятся в противофазе».

Совместим синусоиды так, чтобы их начала слева совпали. Затем синусоиды разойдутся, а через некоторое расстояние сойдутся снова. Результат сложения показан на том же рисунке. Видно, что образовались группы волн, обладающие высотой значительно большей, чем в промежутках между ними. (Такие группы волн часто называют еще волновыми пакетами; действительно, получается так, будто волновое содержимое ограничено стенками пакета, за которыми волн практически нет.) Ясно, что волновая группа сама уже имеет несинусоидальную форму, высота горбов в ней непостоянна.

А теперь пустим обе синусоиды, скажем, слева направо, причем с неодинаковой скоростью, так что волна с большей длиной победит и с большей скоростью. Ясно, что двинется в путь и группа волн. Волны с одной длиной будут набегать на волны с другой длиной, и те участки, где горбы одной волны примерно совпадают с горбами другой волны, тоже будут перемещаться в пространстве. Но с какой скоростью?

Настроим наш приемник волн так, чтобы он реагировал только на самые высокие горбы, и будем измерять частоту их прихода. Результаты эксперимента можно записать в виде,

очень похожем на соотношение (1). Если обозначить индексом 1 характеристики первой, а индексом 2 — второй волны, то новое соотношение будет выглядеть так:

$$v = v_1 - v_2 = c_T \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (2)$$

Можно заметить, что в этом соотношении вместо фазовой скорости c_f фигурирует уже другая — скорость движения группы волн, или групповая скорость; поэтому ей и приписан индекс «г» (групповая).

В нашем примере мы складывали только две синусоиды. Конечно, можно складывать и гораздо большее число синусоид: при описании волн сложной формы двумя синусоидами не обойтись. Но принцип сложения и его результаты остаются теми же самыми. Важно лишь отметить, что достаточно протяженную, а потому и хорошо заметную группу образуют лишь волны с близкими длинами. Очень простой и всем известный пример образования группы волн представляют собой звуковые биения. Они создают в ухе неприятное ощущение зудения: звук то усиливается, то ослабевает, например, раз в секунду. Тот же эффект можно получить, если взять на рояле или другом музыкальном инструменте резко диссонирующий аккорд из звуков, отличающихся по высоте на полтона. Биения вызваны тем, что в ухо приходят группы волн, разделенные почти безволновыми промежутками.

Какая из скоростей больше — фазовая или групповая? Это зависит, в первую очередь, от свойств среды. Понаблюдаем, например, за тем, как распространяются волны от брошенного в воду камня. Для этого удобнее встать на высоком берегу, чтобы видеть всю картину в целом. Вот от брошенного камня взметнулся фонтан, рассыпались брызги, а затем, как по волшебству, начала формироваться правильная волновая картина (рис. 4). Она выглядит как круг, заполненный правильными волновыми колечками. Радиус круга, который определяется первым гребнем, сначала медленно, а затем все быстрее начинает возрастать, а число волн в круге множится прямо на глазах. Если присмотреться повнимательнее, то можно заметить, что гребни волн бегут быстрее, чем первый круг. Они как бы рождаются из небытия в месте падения камня, быстро разбегаются от него и затем исчезают. Гребни бегут с фазовой скоростью, а фронт волнового пакета — с групповой скоростью. Стало быть, в данном случае групповая скорость меньше фазовой.

Несколько труднее представить себе обратную картину, когда групповая скорость больше фазовой. Это явление тоже можно наблюдать на поверхности воды, но лишь на достаточно коротких волнах, длиной порядка 2 см и менее. А такие волны нелегко рассматривать.

Описанное явление, при котором фазовая скорость волн зависит от их длины, называется дисперсией. О ней нам еще

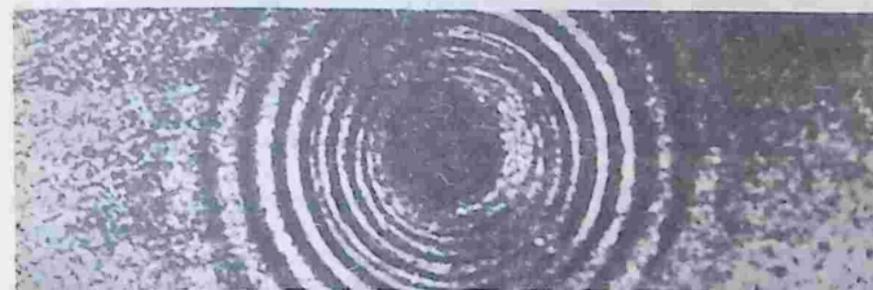


Рис. 4. Распространение волн от упавшего в воду камня. Видны последовательные стадии появления и движения волновых пакетов

предстоит разговор, а пока что укажем, что при распространении волн от импульсного источника (от брошенного в воду камня) дисперсия приводит к расширению волновой области и пополнению ее все большим числом гребней и впадин. Волновая картина как бы рассыпается на группы волн.

Групповая скорость как характеристика распространения пакета имеет еще один важный смысл. Несколько забегаая вперед, скажем, что волновое движение, как, впрочем, и любое другое, требует для своего возбуждения затраты энергии, и эта энергия переносится вместе с волной. Легко сообразить, что энергия волн сосредоточивается в ограниченных волновых пакетах, поскольку между ними волн почти нет. Таким образом, групповая скорость приобретает смысл скорости переноса энергии волнами, что верно, разумеется, не только для пакетов, но и для протяженных волновых областей.

На этом можно закончить первоначальное ознакомление с величинами, характеризующими кинематику волн. Но прежде чем обратиться к динамике волн, надо познакомиться еще с рядом важных характеристик волнового движения.

Рассказывая об открытии Фурье, о возможности разложения волн сложной формы на простые синусоидальные волны, мы могли создать впечатление, что такую процедуру можно осуществить всегда, для волн любой формы. Это, конечно, верно, но, к великому сожалению физиков, не всегда эти волны можно считать независимыми. Другими словами, далеко не всегда каждая волна распространяется так, как если бы других волн не существовало, то есть линейно. Но все же очень многие волновые явления оказываются линейными. Это означает, что в законах, описывающих явления, фигурируют только первые степени важнейших характеристик. А в применении к волновым движениям — только первые степени амплитуд элементарных волн. Это и позволяет алгебраически складывать синусоиды в волну сложной формы и затем изучать суммарную картину как набор независимо распространяющихся волн.

Условие линейности волн имеет очень простое выражение: высота волны должна быть во много раз меньше ее длины. Во сколько именно раз — это зависит от конкретного явления. В подавляющем большинстве явлений, связанных с видимыми волнами, можно гарантировать их линейность, если высота волн меньше их длины в десятки раз. Именно таково соотношение высот и длин большинства морских волн вдали от берегов. Другими словами, линейными обычно — но не всегда — бывают очень пологие волны.

Однако намного более обширна сфера нелинейных волновых явлений. Правда, такие явления гораздо труднее поддаются экспериментальному изучению и теоретическому анализу. Но зато сколь велико их разнообразие, столь же интересно и заманчиво их исследование и применение в технике. Нелинейные волны будут фигурировать на многих страницах нашей книги. А

здесь скажем лишь, что типичным примером нелинейного поведения может служить изменение формы морских волн при их подходе к берегу.

Для волнового движения необходимо существование такого физического объекта, который состоял бы из многих одинаковых и вместе с тем тесно связанных друг с другом частиц. Одинаковость частиц тогда будет гарантировать одинаковость свойств объекта в объемах, намного превышающих размеры частиц. А связь между частицами обеспечивает возможность передачи возбуждения эстафетой от одной частицы к другой. Возбуждение, естественно, имеет смысл вывода частиц из их положений равновесия. Вот эта эстафетная передача возбуждения от одной частицы к другой и есть собственно волна. А объект, в котором она распространяется, называется сплошной средой.

9559811
Простейшими движениями частиц среды, по которой распространяется волна, будут, очевидно, движения вдоль и поперек направления распространения волны. Соответственно такие волны называются продольными и поперечными. Примеры их общеизвестны. Если на штанге подвесить ряд одинаковых шариков, связанных друг с другом пружинами, то в такой «среде» можно наблюдать оба вида волн: оттянув и отпустив один из шариков вдоль их ряда, мы возбудим продольную волну, а оттянув шарик перпендикулярно их ряду — поперечную волну.

Но первым наблюдателям волнового движения в природе не «повезло»: частицы на поверхности воды, как мы уже говорили, совершают не продольные и не поперечные колебания, а вращательное движение (даже с небольшой «примесью» поступательного движения). В результате поверхностные волны на воде оказываются более сложным видом волнового движения.

Практически это движение колебательное, каждая частица вновь и вновь возвращается в положение равновесия и снова покидает его. Чтобы такой процесс мог идти в природе, необходимо действие по меньшей мере двух сил.

Одна из них называется возвращающей силой. Она может иметь различное происхождение. Если каким-нибудь образом поднять в одном месте поверхность воды над ее равновесным уровнем, то поднятые частицы будут стремиться упасть. К положению равновесия их, очевидно, возвращает сила тяжести. Вместе с тем, поднимая на одном участке воду, мы растягиваем ее поверхность. Теперь в работу по восстановлению равновесия включается сила поверхностного натяжения. Она успокаивается только тогда, когда площадь поверхности снова станет наименьшей, то есть поверхность горизонтальной.

Работа, затраченная на поднятие участка поверхности воды, сначала перешла в форму потенциальной энергии этого участка. При обратном движении слоя эта энергия перейдет в кинетическую энергию участка жидкости. А кинетическая энергия достигнет наибольшего значения как раз в тот момент, когда слой воды достигает равновесного положения.

Это означает, что слой по инерции проскочит равновесное положение и, как говорится, ударится в другую крайность, опустится, провалится ниже равновесного положения. Что же заставит его снова подняться вверх? Заботу берут на себя смежные участки воды: когда слой воды проходит через равновесное положение вниз, он вытесняет воду из смежных участков, повышая их уровень, поскольку вода практически несжимаема. Теперь уже вода на смежных участках стремится занять равновесное положение. Достичь его, однако, возможно, лишь вернув виновника возмущения в исходное положение. Кроме того, здесь опять же участвует сила поверхностного натяжения, которой в отличие от силы тяжести все равно, в какую сторону прогнута поверхность жидкости — вверх или вниз.

Результат такой игры сил очевиден. Возмущение, которое мы внесли на одном участке, переместилось на смежные участки, а оттуда пошло еще дальше. А короче говоря, возникла поверхностная волна.

Но это еще не все. Известно, что волны на поверхности воды не только легко возбуждаются, они еще и очень живучи. Волны цунами способны пройти без заметного ослабления многие тысячи километров от очага породившего их землетрясения. Мертвая зыбь приносит к берегам свидетельства о шторме, разыгравшемся за сотни километров в океане.

Но попробуйте наблюдать распространение волны в бочке меда!

Дело, очевидно, в том, насколько быстро ослабевают волны при их движении. Ослабление волн — это постепенный переход механической энергии, заключенной в них, в тепловую энергию беспорядочного движения частиц среды, по которой распространяются волны. А скорость такого превращения энергии определяется силой трения частиц среды друг о друга. Ясно, что она значительно выше в меде — среде, более вязкой, чем вода. Вязкость меда столь велика, что механическая энергия созданной в нем волны переходит в тепло практически полностью уже на расстоянии в одну длину волны.

Итак, в конечном счете возникновением и движением волны по поверхности жидкости управляют по крайней мере три силы: тяжести (а также поверхностного натяжения), инерции и внутреннего трения. Это — первый вывод из динамики волн. Более подробно динамику волн на воде мы рассмотрим в последующих главах книги.

За рамками введения осталось еще немало общих характеристик волнового движения. Но мы чувствуем, что наше введение несколько затянулось. Поэтому незатронутые здесь вопросы мы рассмотрим дальше в связи с описываемыми конкретными явлениями.

ВОЛНЫ НА ВОДЕ

Весь в серебристой, мелкой дрожи
Едва приметный ручеек...

А. Фет

Любая наука начинается с наблюдения. Это относится и к физике волн на воде.

Усядемся на берегу пруда и будем наблюдать. Мы совершенно не ощущаем дуновения ветра, но поверхность воды все время морщат мелкие складки. По воде скользят водяные насекомые, и от них разбегаются крошечные волны. Вот с дерева слетел и плавно опустился на воду лист, и от него побежали мелкие круговые волны. Высунула ли любопытная рыба нос из воды, упали ли на воду первые капли дождя — от этих мест бегут маленькие волны. И прихотливо сменяющиеся морщинки, и круговые волночки — все это рябь на воде. Для волн ряби характерны длины примерно 2 см и меньше.

Переменим место наблюдения и расположимся на морском берегу. Достаточно подуть слабому ветерку, и мы увидим, как на смену мелкой ряби приходят небольшие, но уже вполне отчетливые параллельные ряды невысоких волн. Увеличились и высота гребней, и расстояния между ними. Можно заметить, что длина волн меняется медленнее, чем высота их гребней.

Море начинает вздыхать: нарастает шум прибоя. В промежутках между глухими вздохами можно услышать легкий дробный звук перекатываемой гальки. Ветер постепенно крепчает, и волны уже не лижут кромку берега, а накатываются на него, обрушиваясь с грохотом, разбиваясь на отдельные брызги и покрывая берег пенной бахромой. Белые от пены гребни волн — барашки — можно видеть и вдали от берега, где они то появляются, то пропадают.

Чем дальше от берега, тем меньше регулярности в волнении моря. Вот судно оказалось в открытом море. Здесь от правильной череды размеренно движущихся валов уже не остается и следа. Сколько ни охватывает взор, вся водная поверхность пересечена холмами разной высоты, движущимися на первый взгляд даже по разным направлениям. Водяные холмы имеют неправильную угловатую форму, испещрены выступами и рытвинами, вершины холмов заострены. А между ними пролегают обширные долины, покрытые длинными полосами пены. После кратковременного затишья на судно вдруг накатываются одна или несколько особенно высоких волн, заливая всю палубу.

Кажется даже неуместным говорить о какой-то регулярности, периодичности, которая вроде бы должна быть обязательным признаком волнового движения. И тем не менее это тоже вол-

ны — развитые ветровые волны во время шторма. А нерегулярный и быстросменяющийся их вид — это результат нелинейного взаимодействия различных простых синусоидальных волн.

Вот ветер стихает, а потом и вовсе прекращается. Но волнение моря тотчас же не исчезает. Волновая картина постепенно принимает все более упорядоченный вид, столь милый нашему взору. Волны становятся все более округлыми, хотя и остаются достаточно высокими. Вместе с тем они делаются более пологими и уже идут не как попало, а широкими параллельными рядами. Такие отголоски шторма называются мертвой зыбью.

Явь, мертвая зыбь и ветровые волны, однако, далеко не исчерпывают всего разнообразия волн на море. Два раза в сутки повышается уровень воды у берега и два раза в сутки вода отступает. Это приливные и отливные волны. Кажется даже странным говорить при этом о волне, столь невысока она подчас и столь медленно происходит повышение и понижение уровня воды. А между тем прилив и отлив — самая настоящая волна, только чрезвычайно пологая, поскольку длина приливной волны достигает нескольких тысяч километров, а высота даже в крайних случаях — лишь полутора десятка метров, обычно же это метр, а то и меньше.

Порой колебания уровня воды в море происходят чаще, с периодом до полутора часов. Это — сейши, стоячие волны, сходные с колебаниями уровня воды в ванне или в тазу, если его наклонять попеременно в одну и другую сторону. Изредка к океанскому берегу неожиданно приходят одна или несколько волн огромной высоты, которые вызывают на берегу страшные разрушения, — цунами. Приливные волны, сейши и цунами — волны с очень большими длинами, в сотни и тысячи километров.

Но поднимемся вверх по реке, впадающей в море, и мы встретимся здесь с не меньшим разнообразием волн. Прежде всего это отголосок приливной волны: распространяющаяся против течения подчас довольно высокая водяная стена, называемая бором. А если по реке пройдет моторная лодка, мы сразу увидим целую систему волн: волны, расходящиеся от носа лодки под косым углом к направлению ее движения и накатывающиеся на берега реки; позади лодки — волны, движущиеся вслед за ней; у берегов — сложную картину, образованную набегающими на берег и отраженными от него волнами; возле берега торчат несколько полузатопленных кустов, и набегающая на них вода образует вокруг прутьев небольшие волны.

Волны можно заметить и в ручье, текущем после дождя у края тротуара, и в струе воды, вытекающей из горлышка бутылки, и в раковине возле сливного отверстия.

Какие же первые выводы напрашиваются, когда мысленно обзриваешь все это многообразие волн на поверхности воды? Прежде всего бросается в глаза чрезвычайно широкий диапазон длин волн от миллиметров до многих тысяч километров. Дальше, волны имеют чрезвычайно разнообразную форму: от почти синус-

соидальной для волн мелкой ряби до очень заостренной — у гребней ветровых волн и совсем не напоминающей синусоиду у волн, разбивающихся возле берега.

Весьма разнообразны и очертания фронта волн: круговые волны, возникающие при падении камня в воду; плоские волны мертвой зыби или волны позади прошедшего корабля; загнутые, идущие как бы внахлест косые волны от носа корабля; подковообразно изогнутые волны ряби вокруг препятствий, на которые набегают вода; сетка перекрещивающихся волн в ручье; трудноопределимые формы морских волн в шторм.

Очень различна и крутизна волн.

Наконец очень многочисленны и причины возникновения волн. Это и ветер, и падение предметов в воду, и движение кораблей, и набегание воды на неподвижные препятствия, и землетрясения, и даже движение Луны и Солнца.

Прежде чем разобраться во всем этом многообразии волн на воде, надо указать главные физические факторы, определяющие существование волн, и характерные условия, в которых они движутся. Два таких фактора мы уже называли — гравитацию и поверхностное натяжение. В соответствии с этим все волны на воде можно отнести к двум широким классам — гравитационным и капиллярным. (Происхождение первого названия вполне естественно: их существование определяет сила притяжения Земли. Однако впоследствии то же название получили и до сих пор не обнаруженные волны самого поля тяготения, которые ввел в физику Эйнштейн. Спутать оба вида гравитационных волн, конечно, невозможно; в нашей книге речь будет идти лишь о первых из них. Происхождение второго названия связано с тем, что силы поверхностного натяжения ответственны за явления, происходящие с жидкостями в тоненьких трубочках — капиллярах. Поэтому явления, вызываемые этими силами, в том числе и волны на поверхности воды и других жидкостей, получили название капиллярных.)

В некоторой, впрочем довольно узкой, области, где роль силы тяжести в образовании поверхностных волн сравнима с действием сил поверхностного натяжения, волны относят к смешанному классу и соответственно называют гравитационно-капиллярными.

Основных условий, в которых распространяются волны, тоже два. Они называются глубокой водой и мелкой водой. Понятия мелкого и глубокого в сущности относительны: скажем, пловец сравнивает глубину водоема со своим ростом, а моряк — с осадкой корабля. В явлении распространения волн эти понятия также имеют относительный смысл и сравниваются с длиной волны (но не высотой волны, что было бы естественным для пловца или моряка). Глубокой водой называются такие участки водоема, где глубина, или расстояние от поверхности до дна, превышает длину волны, а мелкой водой — где оно меньше длины волны.

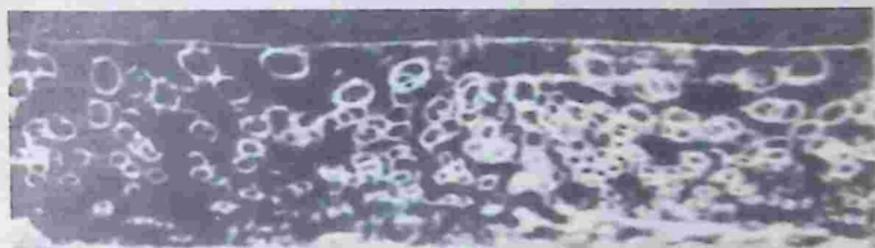
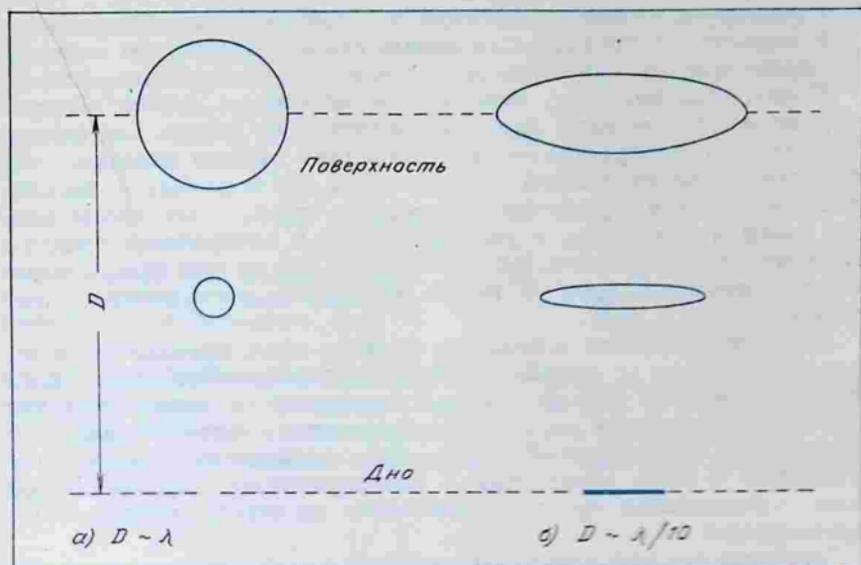
Отсюда следует, что для линейной волны сложного профиля, составленной из ряда синусоидальных волн с существенно различающимися длинами, водоем может одновременно оказаться и глубоким и мелким. Но это не такая уж сильная неопределенность. Гораздо важнее, какой конкретный смысл вкладывается в слова «больше» и «меньше» и каким считать водоем, если длины волн примерно такие же, как его глубина.

Теория в хорошем соответствии с наблюдениями показывает, что глубокой можно считать воду, если глубина водоема превышает примерно половину длины волны, и мелкой — если глубина примерно в десять раз меньше длины волны. Чем объяснить такое неравноправие в границах мелкой и глубокой воды? Ведь ни один пловец не назовет глубокой воду, которая доходит ему до пояса. Такую воду он с полным правом назовет мелкой, а о мелкой воде в нашем определении он вообще пренебрежительно скажет: «Курам вброд!»

Но тут дело вот в чем: то, что может показаться нелепым пловцу (или моряку), имеет большой смысл для волн. Характер распространения волн на глубокой и мелкой воде имеет принципиальное различие. Оно возникает из-за того, что волновое движение очень быстро затухает с увеличением глубины. По этой причине морское волнение, даже очень сильное, слабо ощущается на подводных кораблях уже при сравнительно неглубоком их погружении. Затухание происходит по так называемому экспоненциальному закону, и уже на глубине в половину длины волны амплитуда смещения частиц воды в вертикальном направлении в 23 раза меньше, чем на поверхности, а на глубине в целую длину волны — даже в 500 с лишним раз меньше. В результате, когда глубина водоема больше длины волны, волнение уже почти не достигает дна. При мелкой же воде весь слой жидкости от поверхности до дна охвачен волнением.

Можно поставить несложный опыт. Нальем воду в сосуд с прозрачными стенками, так чтобы волны можно было наблюдать и фотографировать сбоку. Высыпем в воду какой-нибудь порошок, чтобы частицы его медленно погружались на дно и в то же время были хорошо видны в воде. На одном конце сосуда установим источник волн, например колеблющийся стерженек, а на другом — какое-либо приспособление для гашения волн, например постепенно повышающееся дно. Это нужно затем, чтобы устранить отраженные волны, которые могут спутать всю картину.

Включим источник волн на достаточно продолжительное время для нашего наблюдения и подберем его частоту так, чтобы длина возникающих волн была бы хоть немного меньше глубины сосуда. Мы увидим, что частицы порошка совершают в воде почти круговое движение (рис. 5). У поверхности воды радиус окружностей наибольший, но он быстро уменьшается и уже на глубине в половину длины волны частицы остаются практически неподвижными.



в

Рис. 5. Траектории частиц, участвующих в волновом движении: а — на глубокой воде; б — на мелкой воде; в — фотография для случая глубокой воды

Изменим затем частоту источника волн так, чтобы их длина оказалась раз в десять больше глубины воды в сосуде. (Если при этом длина волны окажется слишком большой, чтобы уместиться в сосуде, то можно поднять дно сосуда, положив на него какую-нибудь гладкую прокладку.) Теперь мы увидим совершенно иную картину. Частицы движутся в воде уже не по окружностям, а по эллипсам. Длинные оси этих эллипсов направлены горизонтально, и длина их не очень значительно меняется на протяжении от поверхности до дна сосуда. Короткие же оси постепенно сокращаются от поверхности ко дну, так что эллипсы все более сплюсциваются. Но даже на самой поверхности эллипсы

уже сильно сплющены, а на глубине вертикальные движения частиц становятся практически незаметными. Видно, что частицы при прохождении над ними волны лишь колеблются взад-вперед.

Почему же волна на поверхности, способная пройти расстояния, во многие тысячи раз превышающие ее длину, так быстро глохнет при распространении в глубину? (Надо сказать, что это — свойство не только волн на воде, но и любых поверхностных волн: и упругих волн в твердых телах, и электромагнитных волн в металлах, и световых волн в прозрачных средах.) Ясно, что трение частиц, вязкость среды тут ни при чем: в однородной среде она одна и та же, что вдоль поверхности воды, что в глубину.

Дело заключается в том, что энергия волн, передаваемая эстафетным путем от одной частицы к другой, может эффективно распространяться только в том направлении, в каком частицы способны воспринять ее, то есть обладают достаточной свободой возможных перемещений. Ясно, что частицы на поверхности находятся в этом отношении в благоприятных условиях: над ними — воздушная среда, практически не ограничивающая их перемещений.

Частицы же под поверхностью воды находятся в стесненных условиях, поскольку вода очень мало сжимаема. Поверхностная частица может передать находящейся под ней частице лишь небольшую долю своего движения. И дальше вниз эта и без того небольшая доля от частицы к частице становится пропорционально все меньше и меньше, в результате чего волна быстро ослабевает вглубь.

Приведем теперь теоретически найденные выражения для фазовой скорости волн на глубокой и мелкой воде.

Фазовая скорость гравитационных волн на глубокой воде оказывается равной

$$c_{\phi} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}, \quad (3)$$

а в случае мелкой воды она равна

$$c_{\phi} = \sqrt{gD}. \quad (4)$$

Здесь g — ускорение силы тяжести, λ — длина волны, а D — расстояние от поверхности до дна.

В промежуточном случае не глубокой и не мелкой воды получается более сложное выражение для c_{ϕ} , которое мы опустим. Это выражение в случае $D \geq \lambda$ переходит в формулу (3) для глубокой воды, а при $D \ll \lambda$ — в формулу (4) для мелкой воды.

Учтем теперь, помимо веса жидкости в волновом слое, еще и силу поверхностного натяжения, действующую на участок, растянутый волной. Поверхность этого участка можно представить как дугу окружности радиусом R тем большим, чем больше длина волны и меньше ее амплитуда. По известной формуле для давления сил поверхностного натяжения на кривую поверхность

Рис. 6. Зависимость фазовой и групповой скоростей от длины волны для гравитационно-капиллярных волн



имеем $P = 2\sigma/R$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Это давление следует добавить к тому, которое оказывает вес слоя жидкости. С учетом этого вклада фазовая скорость гравитационно-капиллярных волн на глубокой воде оказывается равной

$$c_{\phi} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} \quad (5)$$

Рассмотрим внимательно эту формулу. Видно, что с ростом длины волны λ вклад силы тяжести растет, а вклад сил поверхностного натяжения столь же быстро падает. Напротив, с уменьшением длины волны все большее значение приобретает сила поверхностного натяжения. Если построить график зависимости c_{ϕ} от λ по формуле (5) для воды (рис. 6), то легко увидеть, что значение c_{ϕ} становится минимальным для длины волны $\lambda^* \approx 1,7$ см; это значение приблизительно равно $c_{\phi}^* = 23$ см/с.

Волны с длиной волны меньше 1,7 см и называются капиллярными, или волнами ряби. Ясно, что для них практически не существует условий мелкой воды, разве что на блюдечке, когда вы дуете на чай, чтобы остудить его.

Из формулы (5) и построенного по ней графика (рис. 6) выводится очень важная особенность: на глубокой воде всегда существует дисперсия, то есть при всех значениях длины волны λ короткие волны будут всегда двигаться с другой скоростью, чем длинные. Это означает, что на глубокой воде волны всегда будут менять свой вид. Но эти изменения для волн с $\lambda < \lambda^*$ и $\lambda > \lambda^*$ имеют совершенно различный характер. В области длин волн слева от λ^* короткие волны будут распространяться быстрее длинных, а в области справа от λ^* более короткие волны, напротив, будут отставать от более длинных.

На мелкой воде положение оказывается совсем иным. В формулу (4) длина волны не входит, и это означает, что волны любой длины, существенно превышающей глубину водоема D , будут перемещаться с одной и той же фазовой скоростью, определяемой лишь значением D . Иными словами, рассыпания вол-

новой картины на группы волн (дисперсии) происходить не будет. Групповая скорость будет равна фазовой скорости волн.

Вместе с тем, рассматривая график, можно видеть, что в окрестности длины волны λ^* , где фазовая скорость приближается к своему минимальному значению, она меняется в зависимости от λ довольно медленно. Поэтому в области длин волн примерно от 1 до 4 см, хотя дисперсия и существует, она очень незначительна, и волны на глубокой воде в этом диапазоне своих длин ведут себя очень сходно с волнами на мелкой воде.

Установим теперь количественную связь между групповой и фазовой скоростями гравитационных и капиллярных волн. Как и раньше, пусть в одном направлении две синусоидальные волны с близкими длинами. Возьмем в формуле (2) v_1 на $c_{\phi 1}/\lambda_1$, v_2 на $c_{\phi 2}/\lambda_2$ и примем, что $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = \lambda + \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ — добавок к λ , малый по сравнению с λ . Обозначим $c_{\phi 1} = c_{\phi}$, $c_{\phi 2} = c_{\phi} + \Delta c_{\phi}$; легко понять, что добавок Δc_{ϕ} тоже будет мал по сравнению с c_{ϕ} . Подставив эти выражения в формулу (2), найдем общее соотношение:

$$c_g = c_{\phi} - \lambda \frac{\Delta c_{\phi}}{\Delta \lambda}. \quad (6)$$

Соотношение между добавками Δc_{ϕ} и $\Delta \lambda$ зависит от конкретной связи между c_{ϕ} и λ . Несложные вычисления показывают, что для гравитационных волн $\Delta c_{\phi}/\Delta \lambda = 1/2 c_{\phi}/\lambda$, так что получаем следующий важный результат:

$$c_g^{(\text{грав})} = \frac{1}{2} c_{\phi}^{(\text{грав})}. \quad (7)$$

Групповая скорость гравитационных волн вдвое меньше фазовой.

Аналогичное вычисление для капиллярных волн дает $\Delta c_{\phi}/\Delta \lambda = -1/2 c_{\phi}/\lambda$, так что

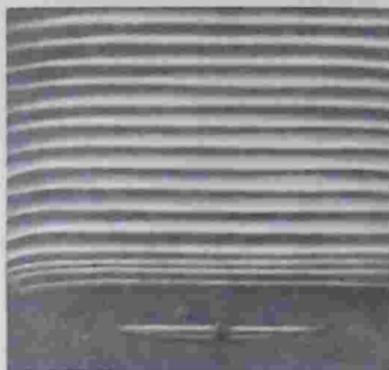
$$c_g^{(\text{кап})} = \frac{3}{2} c_{\phi}^{(\text{кап})}. \quad (8)$$

Групповая скорость капиллярных волн в полтора раза больше фазовой.

Это означает, что в группе возбужденных на воде гравитационных волн лидировать будут длинные волны. Действительно, бросив камень в воду, мы заметим, что сначала к берегу приходят длинные волны и лишь затем появляется группа хорошо оформленных коротких волн. В случае капиллярных волн положение обратное: у них группа коротких волн подходит к краю водоема первой, а уже за нею подходят длинные волны.

Однако сложный характер этой картины движения волн почти совершенно исчезает, если для возбуждения волн на воде использовать не мгновенный, импульсный источник (тот же камень), а периодический источник (например, помещенный в ванну колеблющийся стерженек). Тогда по ванне побегут прак-

Рис. 7. Образование стоячей волны при отражении плоской волны от плоской стенки



тически монохроматические волны, с одной-единственной частотой и длиной волны. Если стерженек колеблется с постоянной амплитудой, то все гребни волн будут иметь одинаковую высоту. Но это уже будут не свободные волны, движущиеся после выключения их источника, а вынужденные волны. С помощью таких волн можно продемонстрировать ряд волновых явлений, которые имеют важнейшее значение для физики и техники, — интерференцию, отражение, преломление и дифракцию волн. На круговых волнах соответствующие волновые картины выглядят сложно, поэтому для начала лучше демонстрировать их на плоских волнах, которые можно получить, поместив в воду вертикально колеблющуюся тонкую пластинку.

Начнем с отражения волн. Установим на пути плоских волн плоское же препятствие сначала перпендикулярно направлению движения волн. И сразу же заметим удивительное явление — волны перестанут бежать, волновая картина застынет (рис. 7). А ведь наш волнопродуктор работает, создавая все новые волны! Почему же бегущие волны превратились в стоячие? Это результат интерференции двух волн — бегущей на препятствие и бегущей обратно от препятствия, другими словами, результат сложения двух противоположно направленных волн.

Раньше мы тоже занимались сложением волн, но тогда волновая картина не застывала, поскольку там мы складывали бегущие в одну сторону волны неодинаковой длины. Там имело место сложение волн, но в каждый следующий момент времени его результат был другим, волновая картина и двигалась по сосуду и все время менялась. Волнопродуктор же создает волны одинаковой длины, и, кроме того, обе волны — падающая и отраженная от препятствия — имеют все время одинаковую разность фаз. Отражаясь от препятствия, волна переворачивается — фаза ее скачком изменяется на 180° .

Если изобразить обе эти волны на рисунке и алгебраически, то есть с учетом знаков, сложить смещения частиц в них, то мы увидим, что образуется новая волна, в которой высоты греб-

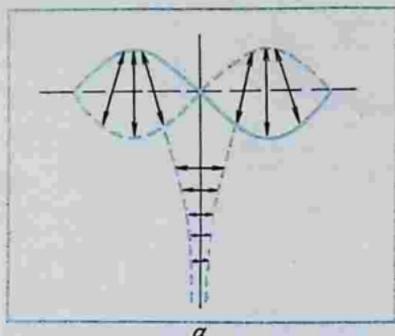


Рис. 8. Движения частиц воды в стоячей волне: а — расчетная картина; б — фотোগрафия



б

ней оказываются вдвое выше, чем в каждой из бегущих волн. Эта картина не будет меняться со временем: соответственные точки в обеих волнах будут во все время распространения этих волн неподвижны друг относительно друга.

Но неподвижность волны в пространстве, разумеется, не означает, что в ней замерли и сами частицы. Напротив, они совершают весьма разнообразные движения (рис. 8). Поскольку волна застыла, значит, энергия вдоль всего дуга волн не распространяется. Она оказывается сосредоточенной в каждой из волн, в определенных ее участках. В точках на полпути от гребней к впадинам — они называются узлами, — где смещение поверхности воды из положения равновесия равно нулю, эта энергия минимальна. В наивысших точках горбов и впадин — они называются пучностями — энергия максимальна.

Естественно, ее значение зависит от высоты волн. Чем дальше поверхность воды отведена от положения равновесия, тем большую работу на это пришлось затратить, тем более значительная энергия передана волне. Вместе с тем, конечно, эта энергия тем больше, чем больше масса воды, охваченная одной волной.

Горб волны можно представить треугольником высотой $h/2$, где h — полный размах, высота волны, и длиной основания

$\lambda/2$, так что его площадь равна $\frac{1}{2} \left(\frac{h}{2}\right) \left(\frac{\lambda}{2}\right) = \frac{h\lambda}{8}$, а масса

$m = \rho h\lambda/8$. Вся работа, затраченная на создание горба, перешла в его потенциальную энергию. Ее величину можно найти, умножая mg на среднюю высоту подъема, равную приблизительно $h/4$. Добавляя к потенциальной энергии кинетическую, которая в периодических процессах равна потенциальной, можно найти энергию E волны в расчете на одну длину волны (то есть на расстояние между гребнями):

$$E = \frac{1}{8} \rho g h^2 \lambda. \quad (9)$$

Эта энергия, как мы уже отмечали выше, в бегущей волне распространяется с групповой скоростью волны.

Оказывается, что, кроме энергии, бегущая волна переносит с собой импульс. Этот импульс p , также рассчитанный на одну длину волны, равен

$$p = \frac{E}{c_{\phi}} = \frac{1}{8c_{\phi}} \rho g h^2 \lambda. \quad (10)$$

Именно наличие импульса у волн позволяет водомерке бегать по воде и оставлять за собой капиллярные волны. В стоячей волне, разумеется, встречные переносы энергии набегающей и отраженной волной компенсируют друг друга, а суммарный импульс стоячей волны обращается в нуль.

Когда образуются стоячие волны, энергия каждой волны в их дуге должна стать вдвое больше. Как она распределяется при движении частиц, можно увидеть на рис. 8. Видно, что в пучностях частицы совершают вертикальные перемещения, в узлах — горизонтальные, а в промежуточных точках — наклонные. Если при этом повторить наш опыт с частицами порошка, погруженными в воду, то мы увидим именно такую картину. Она ничем не напоминает орбиты частиц в бегущих волнах, показанные на рис. 5.

Стоячие волны могут образовываться также и при наложении двух волн, бегущих под углом друг к другу. Расположим наше препятствие под углом 45° к направлению набегающей на него волны. Для волн на воде, как и других волн, угол падения равен углу отражения, так что отраженная волна будет распространяться под углом 90° к падающей волне. Мы снова увидим стоячую волну, которая теперь выглядит как регулярные ряды пучностей, похожих на пирамиды и разделенных квадратной сеткой узловых линий (рис. 9). Такую картину можно наблюдать и в природе, когда волны под углом набегают на берега. При отражении морских волн от волноотбойных стенок можно заметить, что гребни волн нарастают, вершины их заостряются и возникает водяная толчая.

Еще более красивые волновые картины образуются при ин-

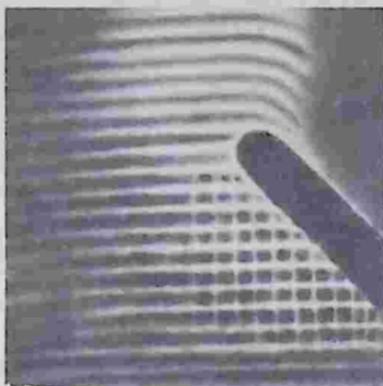


Рис. 9. Образование стоячей волны при наложении плоских волн под прямым углом друг к другу

Рис. 10. Волновая картина при наложении круговых волн

терференции круговых волн. Такую интерференцию можно осуществить, поставив, например, на пути волн сбоку плоское препятствие или же создав волны одновременно двумя стерженьками, колеблющимися с одинаковой частотой и амплитудой. Собственно говоря, это одно и то же. Различие будет заключаться лишь в том, что в первом случае волновая картина займет половину пространства, во втором — все пространство.

Что же это за картина? Она также выглядит стоячей, хотя и не на всем своем протяжении (рис. 10). В ней также чередуются пучности и узлы, хотя и линии пучностей и узлов выглядят иначе, чем для плоских волн. Пучности теперь располагаются в точках, отстоящих на одинаковых расстояниях от обоих источников, где разница в фазах гребней равна нулю. А кроме того, в точках, где разница в фазах составляет $360, 720^\circ$ и т. д., то есть там, где расстояния от обеих источников различаются на целое число длин волн (или четное число полуволн).

Геометрическим местом таких точек, расстояние которых от двух других есть постоянная величина, служит гипербола (и, конечно, прямая, проведенная посередине между источниками). Поэтому пучности будут лежать на этой прямой и на гиперболических кривых. (В случае препятствия в виде плоской стенки, конечно, прямой не будет: она совпадает с плоскостью препятствия.)

В свою очередь узлы расположатся в точках, куда волны от двух источников придут с разницей в фазах $180, 540^\circ$ и т. д., то есть в точках, расстояния которых от обеих источников различаются на нечетное число полуволн ($1/2\lambda, 3/2\lambda$ и т. д.). Геометрические места таких точек тоже гиперболы, но расположенные между гиперболой для пучностей. Чередование этих гипербол и создает красивую волновую картину.

Приглядевшись, однако, можно заметить, что эта картина, столь отчетливая вблизи источников волн, по мере удаления от них становится все менее отчетливой и более зыбкой. Почему? Да потому, что даже в отсутствие вязкости и поглощения волн высота круговых волн, хотя и медленно, но убывает по мере их распространения от источника. (Это происходит и с волнами от брошенного в воду камня, так что если берег находится далеко от места возникновения волн, до него вообще не дойдут заметные волны.)

Конечно, ограничившись таким утверждением, мы в действительности мало что объясним. Физическая суть явления останется скрытой. А она состоит вот в чем. В отличие от плоских волн энергия, переносимая круговыми волнами, по мере их движения от источника распределяется по все более широкому фронту волны. На единицу длины фронта приходится все меньшая энергия, а значит, и уменьшается высота волны. (Отметим при этом следующее обстоятельство. Плотность энергии на единицу длины фронта круговой волны должна убывать пропорционально радиусу фронта, то есть меняться как $1/R$. Но поскольку сама энергия пропорциональна квадрату высоты волн, то эта высота будет убывать только как $1/\sqrt{R}$. Аналогично для сферической, объемной волны, у которой площадь фронта пропорциональна R^2 , плотность энергии на единицу площади фронта будет спадать как $1/R^2$, а высота волн — как $1/R$, то есть значительно более медленно.)

А раз так, то волны с одной и той же высотой будут складываться только на одинаковом расстоянии от обоих источников, и такие точки расположатся лишь на прямой, перпендикулярной линии, соединяющей источники. На гиперболах складываются волны с гребнями разной высоты, то есть абсолютные узлы (где смещения точек равны нулю) вообще не появятся. Наиболее отчетливо интерференционная картина наблюдается в точках на прямой, проходящей между источниками, и в точках, не слишком удаленных от нее, а именно лежащих от обоих источников на таких расстояниях, которые не очень значительно отличаются друг от друга. Чем больше различаются по амплитуде волны, приходящие в данную точку, тем более смазанными оказываются пучности и узлы стоячей волны и тем слабее она выражена. Именно это и наблюдается при большом удалении от обоих источников круговых волн.

В результате на фоне стоячей волны появляется бегущая волна, связанная с тем, что складываются волны с различной амплитудой. Такая бегущая волна возникнет и при сложении плоских волн, если они отражаются от препятствия с потерей высоты. По существу это означает, что с отраженной волной складывается и образует стоячую волну только часть падающей волны, высота которой равна высоте отраженной волны, а «незастывший» остаток падающей волны продолжает распространяться дальше. Это легко заметить также по краям отчетливой

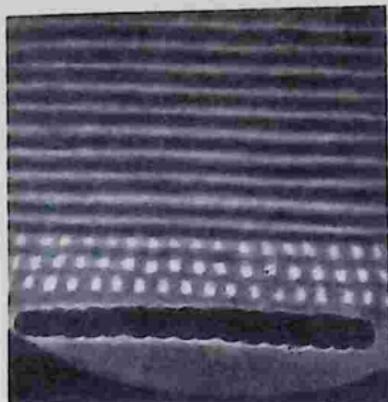


Рис. 11. Возникновение плоской волны при наложении многих круговых волн

стоячей интерференционной картины, создаваемой двумя одинаковыми круговыми волнами.

А теперь увеличим число наших волнопродукторов, скажем, до десятка, но с условием, чтобы все они располагались в шеренгу и порождали волны одинаковой частоты и амплитуды. Какую картину мы увидим? Поскольку каждый источник создает круговые волны, то, казалось бы, их мы и должны наблюдать. Однако на деле все обстоит иначе благодаря интерференции. Интерферируя друг с другом, круговые волны от всех источников рожают... плоскую волну (рис. 11). Она будет тем более плоской, чем больше источников мы взяли и чем ближе друг к другу их расположили (достаточно, чтобы расстояние между ними было порядка длины создаваемых ими волн). И только на самых краях системы источников, расположенных на одной прямой, мы увидим круговые волны.

Что это означает? В сущности то, что любой протяженный источник волн можно заменить соответственно подобранной системой точечных источников круговых волн. Например, прямоугольную пластину для получения плоских волн можно заменить десятком выстроенных в ряд стерженьков. Что же тут удивительного, скажете вы: прямоугольную пластину можно считать составленной из очень большого числа точек, которые мы заменили десятком вибраторов. Правильно, но при этом из виду упускается чрезвычайно важный момент: совокупная волна от всех источников получается в результате интерференции отдельных волночек.

Такая возможность замены реального источника волн системой точечных источников, которые создают интерферирующие между собой волночки, наводит на очень важную мысль. Она получила название принципа Гюйгенса — Френеля. Ведь не обязательно считать источником распространяющейся волны все время реальный волнопродуктор. Можно на какой-то момент как бы остановить волну и принять, что дальше она сама для себя явится источником, сама обеспечит дальнейшее свое

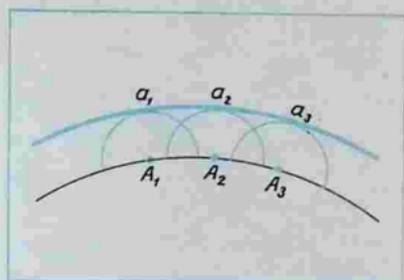


Рис. 12. Пояснение к принципу Гюйгенса. Источники вторичных волночек A_1, A_2, A_3 на фронте волны в некоторый момент создают фронт волны a_1, a_2, a_3 в следующий момент

распространение. Для этого, очевидно, на переднем крае — фронте остановленной волны надо разместить вторичные источники маленьких волночек, просуммировать эти волночки с учетом их интерференции и тем самым найти форму фронта волны в следующий момент (рис. 12).

Если фронт остановленной в какой-то момент волны был плоским, то размещенные на нем вторичные источники, конечно в совокупности, вновь создадут плоскую волну, которая продвинется дальше от первичного источника. Если фронт волны был круговым, то соответствующее построение интерференционной картины даст вновь круговой фронт, только увеличившегося радиуса, как и полагается расширяющейся волне. Ясно, что все точки на фронте волны находятся в одинаковой фазе, поскольку созданы вторичными источниками в один и тот же момент. Поэтому, суммируя вторичные волночки, надо построить их тоже для какой-то одной фазы, а огибающая всех этих волночек и даст положение фронта волны в следующий момент.

Что же в этом интересного? Ведь и без этого очевидно, что плоская волна, которой ничто не мешает, будет и дальше распространяться в виде плоской, что фронт круговой волны в водоеме без берегов останется окружностью. Более того, если считать новый фронт просто огибающей всех вторичных волночек, построенных на старом фронте, то совершенно ясно, что должно возникнуть и волна, бегущая назад! В самом деле, вторичные волночки представляют собой полные окружности, которые, конечно, имеют огибающие не только впереди, но и позади фронта.

Но этой обратной волны никто не видел!

Гюйгенс, выдвигая свой принцип расчета распространения волн, конечно, ничего не мог знать об интерференции, которая была открыта более чем век спустя. Очевидная абсурдность обратной волны оказалась серьезной трудностью для его принципа. Гюйгенс вынужден был принять без доказательства, что этой волны не существует. Решительность от отчаяния при встрече с этой трудностью оказалась столь велика, что Гюйгенс объявил несуществующими даже те волны, которые явно видны на краях системы источников, когда она имеет ограниченные размеры (совокупность стерженьков, имитирующая пластину), или возникающие, когда волна проходит мимо препятствия. Дру-

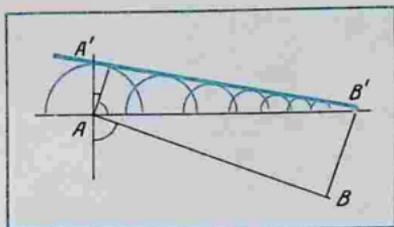


Рис. 13. Приложение принципа Гюйгенса к преломлению волн: AB — фронт падающей волны; $A'B'$ — фронт преломленной волны

гими словами, Гюйгенс выплеснул с водой и ребенка — совершенно правильное и шедшее прямо ему в руки объяснение явления дифракции волн, уже известного в его время.

Правильный выход из этого положения нашел спустя полтора века французский физик Френель, объединив принцип Гюйгенса с незадолго до того открытым явлением интерференции. Новый фронт — не просто огибающая всех фронтов вторичных волночек. Это — линия, на которой только и отличаются от нуля результаты сложения вторичных волночек. И такая линия только одна. Она существует лишь впереди фронта распространяющейся волны. Второй линии, позади фронта, не бывает: там в результате интерференции вторичных волн амплитуда суммарной волны во всех точках строго равна нулю. Обратная волна не образуется именно благодаря интерференции. И та же интерференция автоматически поддерживает неизменной форму фронта распространяющейся волны, когда постоянны свойства среды и нет препятствий на пути волны.

Но, допустим, характеристики среды изменились, волна перешла, например, из глубокой воды на мелкую, и скорость ее распространения стала иной. Если фронт падающей волны параллелен границе глубоководья с мелководьем, то мы ничего не заметим, кроме изменения фазовой скорости распространения волны и такого же изменения ее длины, — это вытекает из соотношения (1), поскольку частота волн, задаваемая их источником, постоянна. Но если фронт волны образует некоторый угол с границей раздела, то волна изменит направление своего распространения. Это явление общеизвестно под названием преломления (или рефракции) волн.

Принцип Гюйгенса легко объясняет его. Если, скажем, на плоском фронте волны в первой среде расположить ряд вторичных источников, то волночки от них придут на границу раздела в разной фазе, поскольку различны расстояния от каждого источника до границы. Поэтому волночки на границе надо построить так, чтобы скомпенсировать возникшую разницу в фазах. Для источника, расположенного там, где фронт уже совпал с границей раздела, надо построить самую большую полукруглость (рис. 13), для источника, расположенного на предельном расстоянии от границы, — самую маленькую, попросту точку. При этом надо учесть, что скорость перемещения фронта по другую сторону границы перехода с глубокой на мелкую воду

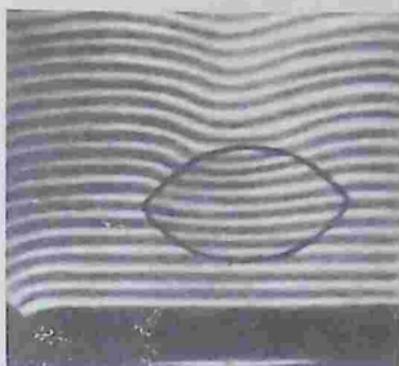


Рис. 14. Рефракция волн на воде

уменьшилась. А теперь строится огибающая ко всем вторичным волночкам. Видно, что она образует меньший угол с границей раздела, чем исходный фронт. Это и есть преломление волн.

Для волн на воде его можно легко наблюдать, сделав на дне ванночки ступеньки (рис. 14). Именно преломление волн не на такой резкой, а на плавно меняющейся границе между глубоководьем и мелководьем объясняет, почему морские волны, идущие под углом к берегу, возле него выстраиваются в ряды, почти параллельные кромке берега.

А теперь мы должны вспомнить то, что отбросил Гюйгенс и что мы могли бы наблюдать на краях системы колеблющихся стерженьков. Речь идет о загибании фронта плоских волн в стороны от системы стерженьков. По существу то, что мы видим, есть отклонение от привычного прямолинейного распространения волн. Это нарушает тот принцип, согласно которому волна в каждый следующий момент точно воспроизводит сама себя, так что форма ее фронта остается неизменной. Особенно ясно это становится, если рассматривать не свободное распространение волн, а прохождение их через препятствия.

Установим на пути плоской волны параллельно ее фронту плоское же препятствие, в котором прорезана щель. Пусть вначале ее размеры будут много больше длины волны. За препятствием мы увидим широкую плоскую волну, занимающую весь проход щели, а по краям щели — еще и волны круговой формы. Согласно принципу Гюйгенса это вторичные волночки, которые созданы источниками, расположенными по краям щели (рис. 15). В целом картина очень напоминает ту, что мы видели для ряда стерженьков. Она имеет и такое же объяснение: вторичные источники посредине щели создали волночки, интерференция которых и вызвала плоскую волну; а волны на краях щели испытали лишь слабую интерференцию и поэтому остались практически круговыми.

Это явление загибания волн в область тени за препятствием

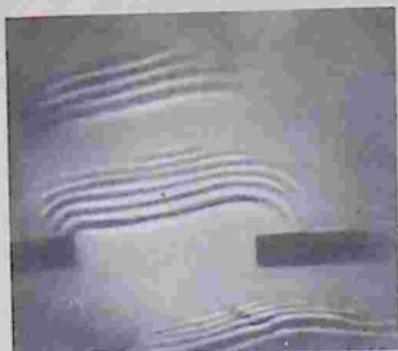


Рис. 15. Дифракция волн на широкой щели

Рис. 16. Дифракция волн на узкой щели

становится все более отчетливым по мере того, как мы будем суживать щель. Если ее размер станет порядка длины волны, то все вторичные источники волночек окажутся очень близкими друг к другу. А значит, их можно заменить одним точечным источником. Такой источник, естественно, создает круговую волну. Ее и можно наблюдать на воде за препятствием (рис. 16).

Таким образом, для дифракции волн решающее значение имеют не абсолютные, а относительные размеры препятствий (или щелей в них), то есть отношения этих размеров к длине волны. Но этого мало. Мы знаем, что круговые волны постепенно ослабевают по мере удаления от источника — неважно, реального или вторичного. Существует риск не обнаружить дифракцию, наблюдая ее далеко за препятствием. Значит, помимо соотношения размеров препятствия и длины волны, надо также учитывать и расстояние от препятствия.

Дифракцию волн в природных условиях можно легко видеть у морского берега, когда к нему с моря идет правильная череда плоских волн, например мертвой зыби. Если судно стоит на якоре боком к волнам (а волны всегда стремятся развернуть его именно в такое — устойчивое — положение, к большому неудовольствию пассажиров, поскольку бортовая качка особенно неприятна), то между ним и берегом при длине судна, существенно большей длины набегающих волн, возникает область тени, область спокойной воды. Но чем дальше от судна, тем сильнее волны от его краев заходят в эту область, так что возле берега может совсем не остаться участков спокойной воды. Если же на небольшое судно накатывают длинные волны мертвой зыби, то тень может вообще не появиться: в результате сильной дифракции волны совершенно не будут «замечать» судна.

Дифракцию волн приходится учитывать, проектируя защитные сооружения в морских портах. Если проход для кораблей



Рис. 17. Волновая картина в акватории порта с узким проходом для судов

в гавань сделать слишком широким, да еще расположить его на той стороне, куда чаще всего приходят высокие волны, то в гавани спокойной воды не будет. Если же проход сделать достаточно узким, то его можно расположить под любым углом. В гавань войдут только дифрагированные волны, высота которых будет убывать при приближении к берегу (рис. 17).

Рассмотренные нами процессы дифракции и интерференции волн выглядят так просто только для линейных, то есть очень пологих, волн, которые просто складываются между собой. Для крутых, нелинейных волн картина усложняется. Такие волны не просто складываются, а взаимодействуют одна с другой. Это приводит к целому ряду весьма интересных явлений. Мы опишем здесь только некоторые из них.

Прежде всего, оказывается, что во многих случаях простые периодические волны, похожие на синусоидальные (но с несколько заостренными гребнями), неустойчивы — они не могут долго сохранять свой ровный порядок. Так, у волн на глубокой воде начинает развиваться процесс, который получил название «самосжатия» волновых пакетов: ровный строй волн стремится разбиться на отдельные пакеты с пониженной амплитудой между пакетами. Вместо ровных волновых шеренг начинает формироваться волновая толчея. Этот процесс очень хорошо наблюдается в экспериментальной ванне, если волнопродуктор создает волны с умеренной (по отношению к длине волны) амплитудой.

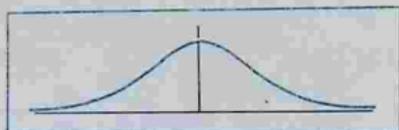


Рис. 18. Профиль солитона



Рис. 19. Подковообразные солитоны на тонкой пленке стекающей воды

Другой интересный нелинейный эффект возникает на мелкой воде. Благодаря нелинейности на ней могут возникать волны очень интересной формы — солитоны, или уединенные волны. Солитон — это одна-единственная волна, которая выглядит словно половинка волны: у нее есть горб, но нет впадины, так что по обе стороны горб плавно переходит в равновесный уровень воды (рис. 18). (Происхождение названия «солитон», в сущности, такое же, как и слова «солист»: это действительно солирующая волна на фоне неподвижной поверхности водоема.) Солитон имеет очень симметричную, но отнюдь не синусоидальную форму. Это существенно нелинейная волна, несмотря на то что формально можно считать, что длина волны у нее простирается до бесконечности (поэтому мы и не наблюдаем впадины). На мелкой воде глубиной примерно более 1 см солитон составлен из гравитационных волн и возникает только при поднятии воды. Солитоны очень легко образуются на мелких широких ручьях, текущих по асфальту: такой ручей всегда покрыт сеткой из пересекающихся стоящих на месте длинных волновых полос. Это и есть солитоны.

На очень мелкой воде, когда основную роль начинают играть капиллярные силы, солитоны приобретают вид маленьких ложбинок чаще всего неправильной формы. Присматриваясь к мелкой струйке, стекающей по асфальту от водосточной трубы, можно наверняка заметить мелкие углубления в виде «птичек». Солитоны более сложной формы можно наблюдать и на тонкой пленке стекающей воды (рис. 19).

ДЛИННЫЕ ВОЛНЫ

...Беспощадно высока,
Безмолвная волна взмывает в небо,
Как кобра за секунду до прыжка.

В. Розанов

Еще в древности люди догадывались, что морские приливы и отливы связаны с движением Луны. Первые предлагавшиеся объяснения такой связи были столь же мифическими, как тогдашние объяснения влияния Луны на жизненные циклы в организме человека и многих животных. Затем по мере развития механики эти догадки встали на научную основу. Приливам, в силу сравнительной простоты их происхождения, «повезло» быстрее, чем другим типам волн. Уже в XVII веке была создана первая правильная теория их возникновения.

Впрочем, приливы довольно долго не привлекали серьезного внимания ученых. Более того, великий Галилей в книге «Система мира» позволил себе упрекнуть Кеплера, занимавшегося теорией приливов: напрасно, мол, сей ученый муж тратит время на изучение подобных пустяков!

Для разгадки происхождения приливов понадобилось открытие всемирного тяготения, и Ньютон вскоре применил свое открытие к созданию первой теории приливов. Эта теория, принципиально правильная и объяснившая важные особенности приливов, прежде всего их сложную периодичность, тем не менее была несовершенной. Она была статической теорией, учитывала лишь силы, вызывающие приливы, но не вызванное ими волновое движение воды. Естественно, винить в этом Ньютона нельзя: начатки науки о движении воды — гидродинамики — были созданы только в следующем веке. Тогда и возникла более точная динамическая теория приливов, основы которой заложил французский ученый Лаплас.

Мы последуем историческим путем — от статики возникновения приливов к динамике приливных волн. Для начала в целях упрощения пренебрежем вращением Земли вокруг оси и будем рассматривать только вращение Земли и Луны. Именно так, а не вращение Луны вокруг Земли: Земля не закреплена в пространстве, равно как и Луна; эти взаимно притягивающиеся тела вращаются не одно около другого, а оба вокруг общего их центра масс.

Луна, конечно, имеет гораздо меньшую массу, чем Земля, но все же она намного массивнее искусственных спутников Земли. Для искусственных спутников общий центр масс находится практически в центре Земли, и можно с полным основанием говорить, что спутник вращается вокруг Земли. Для Луны и Земли общий центр масс тоже находится внутри Земли, но

уже на глубине только примерно в треть земного радиуса.

На любую точку, находящуюся на поверхности Земли, должны действовать как минимум три силы: сила притяжения Луной, сила притяжения Землей и сила инерции — центробежная сила, связанная с вращением Земли вокруг центра масс. Попробуем оценить величины и направления этих сил.

Сила притяжения к Луне, очевидно, различна для разных точек поверхности Земли. Она имеет наибольшее значение в точке «под Луной» и наименьшее — в противоположной точке земного шара. Обозначим расстояние между центрами Земли и Луны через R , а радиус Земли — r . Как известно, $R \approx 60 r$, поскольку расстояние до Луны около 380 000 км, а радиус Земли — около 6 400 км. Тогда по закону всемирного тяготения наибольшее значение силы равно $GM_3M_{\text{л}}/(R-r)^2$, а наименьшее $GM_3M_{\text{л}}/(R+r)^2$, где M_3 и $M_{\text{л}}$ — соответственно массы Земли и Луны, а G — гравитационная постоянная. Разность между ними, поскольку r много меньше R , с хорошей точностью равна $4GM_3M_{\text{л}}r/R^3$. Наибольший угол, который составляет направление от точки поверхности Земли на центр Луны с прямой, соединяющей центры этих планет, как легко подсчитать, составляет около 2° .

Силу тяжести для всех точек на поверхности Земли можно считать постоянной по величине и направленной к центру Земли.

Чтобы оценить центробежную силу, требуется небольшое умственное усилие. Если мы рассматривали бы движение Земли вокруг собственной оси (центр масс в центре Земли), то центробежная сила во всех точках была бы направлена от центра Земли. Но при вращении Земли вокруг общего центра масс с Луной и при отсутствии собственного вращения картина несколько напоминает вращение шарика на веревке: все центробежные силы во всех точках шарика параллельны друг другу, и это направление совпадает с направлением веревки. Величина же силы, действующей на шарик, очевидно, равна центростремительной силе, действующей на веревку. Между Землей и Луной, конечно, никакой веревки нет, и ее с успехом заменяет сила их взаимного притяжения. Значит, центробежная сила во всех точках поверхности Земли имеет одно и то же направление, параллельное линии, соединяющей центры Луны и Земли, и везде равна силе притяжения Земли и Луны.

А теперь нужно сложить все эти силы с учетом их значений и направлений. На рис. 20 мы даем две картины сил — вертикальных и горизонтальных составляющих приливообразующей силы. Видно, что в точке «под Луной» результирующая сила наибольшая и направлена к Луне, она вертикальна. В противоположной ей точке она также наибольшая, но направлена от Луны. Горизонтальная сила в точке «под Луной» и в противоположной ей точке равна нулю, затем она нарастает до максимального значения на окружности, находящейся на полпути к терминатору (границе между освещенной и не освещенной Лу-

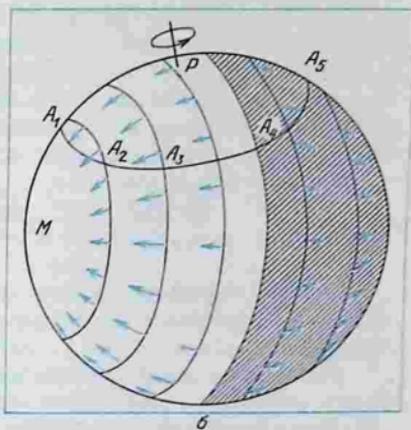
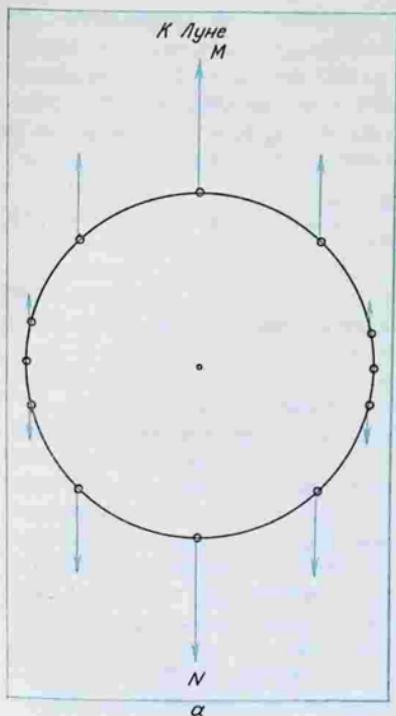


Рис. 20. Составляющие приливообразующей силы: а — в вертикальном направлении; б — в горизонтальном направлении

ной поверхностью), после этого спадает до нуля на терминаторе, а за ним все повторяется в обратном порядке, поскольку горизонтальная сила изменила свое направление на обратное.

Вертикальная сила, складываясь или вычитаясь из силы земного притяжения, может вызвать лишь соответственное понижение или повышение уровня воды. Но привести эту волну в вынужденное движение может только горизонтальная сила.

«Включим» теперь собственное вращение Земли. Пусть наблюдатель расположен на некоей широте. При вращении Земли вокруг своей оси точка, в которой он находится, занимает последовательные положения A_1, \dots, A_5 . В точке A_1 Луна находится у наблюдателя над головой, и горизонтальная сила равна почти нулю. Приблизительно через 3 ч, когда Луна уже уйдет к югу, эта сила достигнет максимума, а еще спустя 3 ч, когда Луна зайдет за горизонт, горизонтальная сила обратится в нуль. После этого она снова начнет возрастать, но уже имея противоположное направление, снова через 3 ч достигнет наибольшего значения, а потом опять снизится до нуля. Таким образом, максимумы и минимумы этой силы наступают 4 раза за сутки, при этом сначала она направлена в одну, а потом в противоположную сторону. Это и означает, что прилив и отлив должны наступать каждые сутки дважды.

А теперь надо вспомнить, что на небе «неподалеку» от Земли есть еще один массивный космический объект — Солнце. Оно находится от Земли примерно в 400 раз дальше, чем Луна, но зато его масса почти в 25 000 000 раз больше массы Луны. Сопоставим приливообразующие силы на Земле, вызванные Солнцем и Луной (индекс «С» относится к Солнцу):

$$G \frac{M_3 M_C r}{R_C^3} \Big/ G \frac{M_3 M_L r}{R_L^3} = \frac{M_C}{M_L} \left(\frac{R_L}{R_C} \right)^3 \approx 0,45. \quad (11)$$

Это не такая уж малая величина! А значит, Солнце тоже способно вызывать приливы на Земле, только раза в два слабее лунных.

Очевидно, наибольшей величины приливы достигнут, когда Луна и Солнце действуют по одной прямой, и наименьшей, когда Луна находится «сбоку» от Солнца, на линии, перпендикулярной к направлению на Солнце. Если Луна находится между Землей и Солнцем, тогда она не видна и наступает новолуние; если она находится позади Земли, тогда она ярко освещена и наступает полнолуние. В периоды новолуния и полнолуния, раз в две недели, прилив должен быть наиболее высоким; он называется сизигийным приливом. В промежуточные периоды прилив оказывается наиболее низким и называется квадратурным. Сравнивая приливообразующие силы от Солнца и Луны, можно заключить, что сизигийный прилив должен быть примерно в 3 раза выше квадратурного.

Таким образом, примерно шарообразная поверхность океана под действием притяжения Луны должна принять форму эллипсоида, слегка вытянутого в направлении к Луне и сплющенного в плоскости, перпендикулярной к этому направлению. Казалось бы, эллипсоид должен был следовать за движением Луны, и приливная волна (вернее, две волны по обе стороны эллипсоида) должна обегать Землю за 24 ч. Причем все приливы в одной и той же фазе (либо в сизигии, либо в квадратуре) должны были бы иметь одинаковую высоту. Но тут вмешиваются астрономические сложности.

Прежде всего, не остается постоянным расстояние от Луны до Земли, расстояние от Солнца до Земли тоже меняется. Вторых, периоды обращения Луны и Солнца вокруг Земли (или Земли вокруг Солнца — сейчас для нас это безразлично) хоть и близки, но все же не совпадают (24 ч для Солнца и 24 ч 50 мин для Луны). Далее, плоскость орбиты Земли наклонена к экватору примерно на 23°, а плоскость орбиты Луны образует с плоскостью орбиты Земли угол примерно 5°. Приливообразующие силы от Солнца и Луны поэтому действуют весьма несогласованно, и, помимо полусуточной и двухнедельной периодичности высоты приливов, должны наблюдаться и более долговременные периодичности.

Но главное все же заключено не в астрономических, а во

вполне земных причинах. Дело в том, что упомянутого выше идеального эллипсоидального профиля поверхности Мирового океана не существует. И причина тому — условия распространения приливной волны. Любая волна на поверхности воды имеет определенную скорость распространения. Приливая волна — очень длинная волна, на экваторе ее длина составляет около 20 000 км. Мировой океан, даже имеющий участки глубиной до 11 км; для такой волны — самое что ни есть мелководье. Тогда по формуле (4) даже при такой глубине скорость распространения получается 1100 км/ч, то есть волна обойдет Землю по экватору примерно лишь за 36 ч, отстав от Луны на полусутки. В действительности же средняя глубина океана еще меньше, и приливая волна придет в точку наблюдения еще позже. Наблюдения показывают, что сизигийные приливы приходят в точку наблюдения обычно спустя 1—1,5 суток после астрономического срока, а во многих местах запаздывают даже на 6—7 суток.

Между тем совершенно очевидно, что существует нужда в предсказании приливов, особенно для неглубоких участков моря, которые в часы отлива могут оказаться слишком мелководными для глубоко сидящих судов. Теоретически рассчитать их с учетом реальной картины и глубин морского дна, влияния закрытых участков моря и берегов просто невозможно. Поэтому приходится вести многолетние записи динамики приливов и отливов в судоходных морях с помощью специальной аппаратуры. Описанию такой аппаратуры можно было бы посвятить целую увлекательную книгу, но мы на этом не можем останавливаться.

Но вот многолетние данные собраны, из них исключаются данные, полученные в нетипичные периоды сильных штормов. А дальше начинается уже знакомая нам процедура. Сложная зависимость высоты приливов и отливов от времени разлагается на элементарные синусоидальные кривые с периодами и фазами, соответствующими астрономическим движениям Луны и Солнца, и высотами, которые отвечают относительным величинам приливообразующих сил для данного географического места наблюдения. Такое разложение можно осуществить, например, с помощью гармонического анализатора или, как его еще называют, фурье-анализатора. Тогда, зная положение Луны и Солнца (они точно вычисляются по формулам небесной механики), можно сложить эти синусоиды в последующие моменты времени. Сложение можно произвести либо с помощью электронных вычислительных машин (расчеты вручную очень трудоемки), либо с помощью так называемых приливопредсказательных машин. Они представляют собой сложные устройства с блоками, кривошипными, электромоторами и прочей механической «начинкой». На выходе этих механизмов стоит самописец, который записывает на барабане прогнозные кривые приливов. Ряд таких кривых показан на рис. 21. Видно, что на некоторых

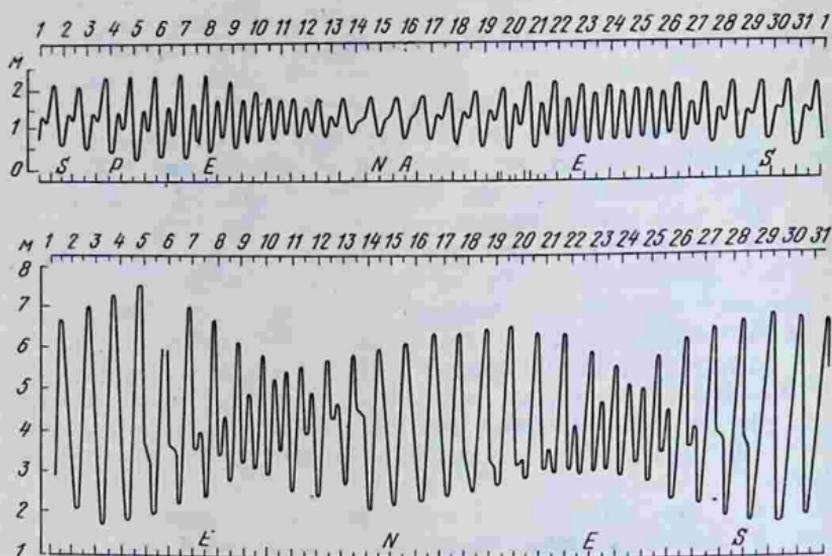


Рис. 21. Прогнозные кривые высоты приливов, рассчитанные синтезом Фурье отдельных периодических слагаемых

из них, кроме нормальных приливов, следующих друг за другом с полусуточным периодом, есть сильные приливы с суточным периодом. Существование одного из подобных приливов с суточной периодичностью, наблюдающегося в Тонкинском заливе, смог объяснить еще сам Ньютон.

Но вернемся к физике приливных волн. Прежде всего, попробуем оценить высоту приливной волны в открытом океане. Это можно сделать следующим простым способом. Примем, что океан покрывает всю Землю шаровым слоем, поверхность которого находится на расстоянии H от центра Земли, так что потенциальная энергия его равна mgH , где m — масса океана. Действие Луны приводит к тому, что шаровой слой превращается в эллипсоидальный, вытянутый в направлении к Луне и сплюснутый в перпендикулярных направлениях на величину ΔH , которую будем считать одинаковой для всех четырех точек гребней и впадин волны. Потенциальную энергию такого деформированного океана E_d можно принять равной $E_d = E_w + 4mg\Delta H$, где E_w — потенциальная энергия недеформированного океана. Повышение потенциальной энергии, естественно, вызвано тем, что на океан совместно с силой притяжения Земли F_3 действует сила притяжения Луны F_L . Поэтому можно записать:

$$\frac{E_d}{E_w} = \frac{F_3 - F_L}{F_3},$$

или, раскрывая значения величин в этой формуле,

$$\frac{4\Delta H}{H} \approx \frac{M_{\text{Л}}}{M_3} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \approx 3,5 \cdot 10^{-6}. \quad (12)$$

Поскольку $H \approx 6,4 \cdot 10^6$ м, отсюда находим $\Delta H \approx 5,5$ м. И действительно, обычная высота приливной волны в океанах составляет 5—7 м.

Вместе с тем известно, что высота приливов в небольших закрытых морях или морях, связанных с океаном узкими проливами, намного меньше. Например, в Белом море она составляет всего лишь 3—4 см в сизигии и лишь порядка 1 см в квадратуре. Известно также, что существуют такие участки моря, где разность высот в максимуме прилива (полная вода) и в максимуме отлива (малая вода) чрезвычайно велика. Например, в Бристольском заливе она достигает 14 м, а в заливе Фанди на побережье Канады — даже 20 м. С чем это связано?

Сначала рассмотрим приливы в морях, полностью или почти изолированных от Мирового океана. В таких морях приливы будут определяться собственными условиями, мало зависящими от движения приливных волн в Мировом океане. Важнейшее условие — сравнительно небольшие размеры таких морей. Сколько-нибудь значительные приливные волны в них просто не успевают образоваться. Волны ведь развиваются не мгновенно. Чем меньше сила, вызывающая их образование, тем дольше она должна действовать, чтобы волны могли достичь большой высоты. В отличие от океанов в небольших морях волна успевает пройти от одного берега к противоположному раньше, чем ее высота успеет вырасти до сколько-нибудь значительных размеров.

Но вот океанская волна подошла к проливу, соединяющему океан с морем. Приливная волна в океане намного выше, чем в почти изолированном от него море. Конечно, она должна войти в море и распространиться по нему. Картина ее распространения в море, которое нередко имеет сложную конфигурацию береговой линии, естественно, тоже окажется достаточно сложной. На рис. 22 показаны карты наступления наивысшего прилива в Белом море и в проливе Ламанш. Линии, проведенные между берегами, соединяют точки, в которых максимум прилива приходится на одно и то же время. Это время на карте для Белого моря выражено в часах после прихода океанского прилива к «горлу», соединяющему море с океаном, а на карте для пролива Ламанш — в астрономических часах и минутах (тонкие линии на первой из карт соответствуют каждой четверти часа). Такие линии называются котидальными.

Из карт видно, что распространение океанской приливной волны медленней в море, действительно представляет очень интересную картину. И действительно. Приливная волна распространяется не только по поверхности воды, и на скорость ее движения влияет дно моря. Мало того, на дви-

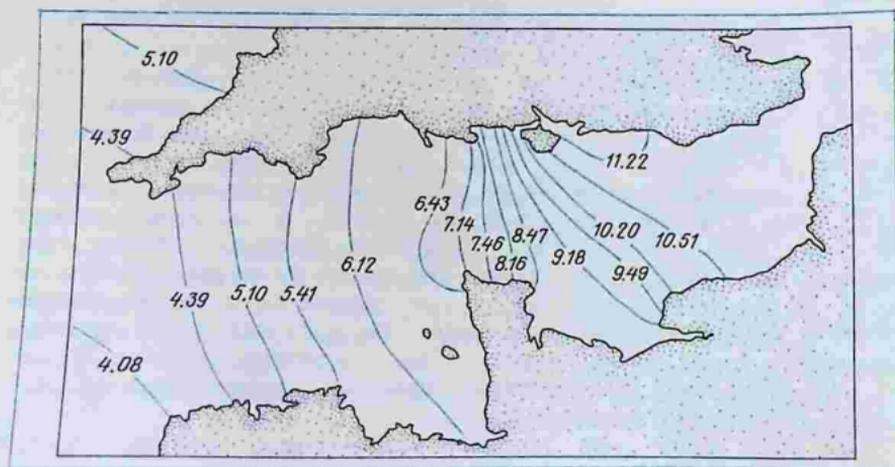
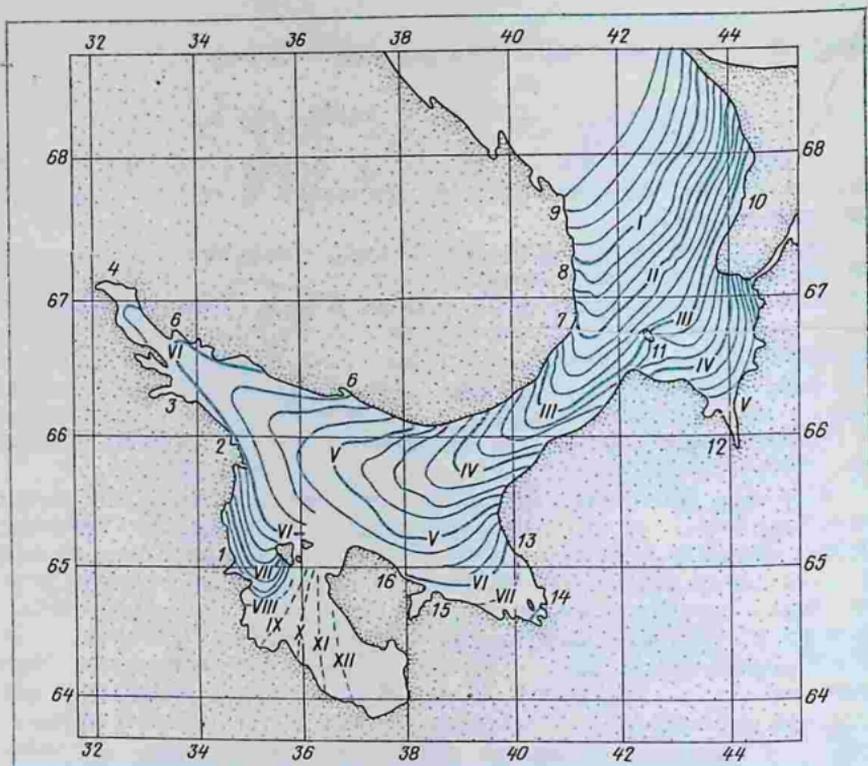


Рис. 22. Карты наступления наивысшего прилива:
 а — в Белом море; б — в проливе Ламани

жение приливной волны, как, впрочем, на движение любого тела у поверхности Земли, оказывает влияние и вращение Земли вокруг оси. Оно вызывает появление так называемой кориолисовой силы, которая в Северном полушарии направлена так, что отклоняет движущиеся по меридиану тела вправо от направления их движения. (Поэтому в Северном полушарии правые берега рек, если смотреть вдоль течения, обычно более крутые и более сильно подмытые, чем левые.) В результате может получиться даже так, как в западной части Ламаншского пролива: по статической теории приливная волна должна двигаться с востока на запад (естественно, против направления вращения Земли), а реальная приливная волна, наоборот, движется с запада на восток.

Когда океанская приливная волна входит в узкие моря и заливы, она может резко увеличить свою высоту. На первый взгляд может показаться, что причина такого повышения уровня воды кроется в проталкивании ее в узкий и сравнительно неглубокий залив. Однако это не совсем так.

Прежде всего, существенно уменьшается длина приливной волны. Используя совместно формулы (1) и (4) и вспоминая, что период волны T обратен ее частоте ν , легко получить для длины волны выражение

$$\lambda = T \sqrt{gD}. \quad (13)$$

Значение T , очевидно, равно примерно 12 ч. Если, скажем, глубина залива или пролива составляет 50 м, то λ уменьшается до 1000 км. Эта величина уже сравнима с размерами самих заливов.

Когда эти размеры составляют половину длины волны, возникает хорошо известное явление резонанса, и в заливе образуются высокие стоячие волны. Стесненный в берегах массив воды начинает «звучать» наподобие органной трубы, усиливая колебания воды в приливной волне. Такое усиление может оказаться весьма значительным: вспомним, например, приводившую выше высоту приливной волны в заливе Фанди.

Путем гармонического анализа в приливной волне можно выделить, помимо полусуточной, и четвертьсуточную составляющую. Значит, залив может резонировать и на нее, причем соответствующее значение λ для такой волны составляет вдвое меньше, чем для волны с периодом около 12 ч. «Органная труба» залива будет отвечать не на «основной тон», а на «гармоники», в данном случае гармонику с периодом 6 ч. Такой резонанс наблюдается, например, в Кандалакшском заливе Белого моря.

Максимальную высоту такая стоячая волна будет иметь у берегов залива, а узловая точка должна находиться возле его выхода в океан, что наблюдается, например, в Бристольском заливе. Если же мы имеем дело с проливом — бассейном, открытым в океан с обоих концов, — соответствующие резонансные их длины окажутся вдвое больше, чем для заливов, линии пучно-

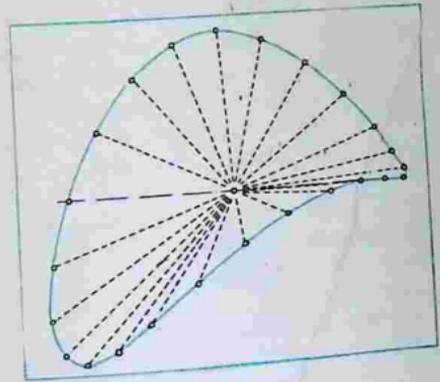
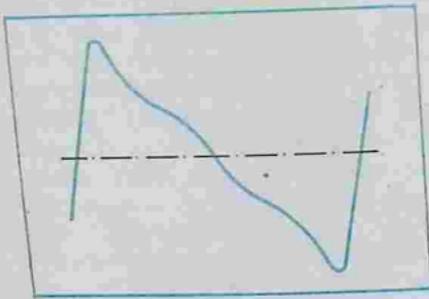


Рис. 23. Форма реальной приливной волны
 Рис. 24. Траектория движения частиц в приливной волне, показанной на рис. 23

стей будут располагаться у выходов из пролива в океан, а узловая линия — посредине пролива.

Интересно рассмотреть траектории, которые частицы воды описывают в приливной волне. Мы уже видели, что в синусоидальной бегущей волне частицы описывают на глубокой воде окружности, а на мелкой воде чрезвычайно сплюснутые эллипсы, практически прямые линии. Поскольку приливная волна имеет длину, во многие тысячи раз превышающую ее высоту, то эти эллипсы действительно должны быть чрезвычайно растянутыми. Но реальная приливная волна вовсе не имеет правильной синусоидальной формы. Например, она имеет форму, показанную на рис. 23.

Это означает, что каждая частица воды участвует одновременно в целом ряде синусоидальных волн с разными периодами. В зависимости от высоты элементарных волн эллиптическая траектория частиц более или менее сильно искажается. Например, для приливной волны, форма которой была показана на рис. 23, эллипс принимает форму очень сложной кривой (рис. 24). Точки на кривой построены через 31 мин (примерно $1/24$ периода волны полусуточного прилива). Укажем лишь, что по обеим осям рисунка нельзя было выдержать одинаковый масштаб. На самом деле надо представить себе, что горизонтальные перемещения частицы в 3 600 раз больше показанных.

Очевидно, вертикальные смещения частиц из положений равновесия вызывают повышение и понижение уровня поверхности воды. Горизонтальные движения, особенно если они велики по амплитуде, создают впечатление настоящих течений, хотя ясно, что вода не втекает и не вытекает безвозвратно из моря, а только колеблется около положения равновесия. Но если амплитуды горизонтальных движений достигают 8 км, как в горле Белого моря (а всего 16 км для полного размаха колебаний), то в

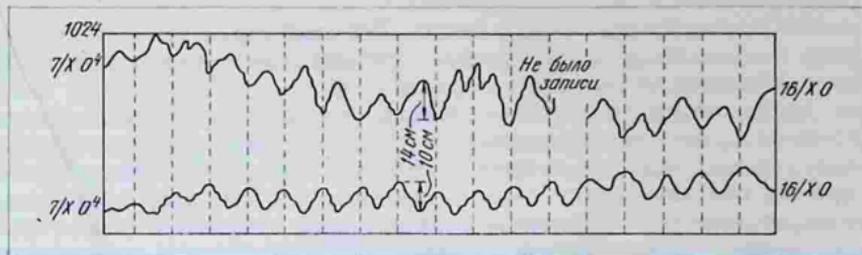


Рис. 25. Запись колебаний уровня воды в сейшах на противоположных берегах Черного моря.

результате возникают очень мощные приливные течения (например, в Мезенском заливе Белого моря их скорость достигает 9 км/ч).

Приливные течения возникают и тогда, когда волна морского прилива входит в реку, которая впадает в море. Движущаяся вверх по реке приливная волна, как мы уже говорили, называется бором. Мы рассмотрим ее позже, в главе, посвященной специально волнам на мелкой воде.

Моря, заливы, проливы и водоемы меньших размеров могут, очевидно, резонировать не только с приливными волнами. Стоячие волны в них нередко образуются при отражении от берегов бегущих волн, возникших в результате колебаний атмосферного давления, действия ветра, землетрясений и т. п. Амплитуда таких стоячих волн может достигать нескольких метров, и возникшая волновая картина сохраняется в течение значительного времени после прекращения действия силы, вызвавшей волнение.

Подобные стоячие волны называются сейшами. В изолированных морях они нередко совершенно маскируют сравнительно невысокие приливные волны. Но, разумеется, волновая картина сейшей совсем не похожа на колебания уровня воды во время приливов. Например, если на протяжении водоема укладывается половина стоячей волны, то колебания уровня моря на противуположных берегах будут находиться в противофазе (то есть с сдвигом фаз на 180° по отношению друг к другу). Пример записи сейшей на Черном море приведен на рис. 25. Видно, что наибольшая разность в уровнях воды (гребень на одном берегу и впадина на противоположном) составляет примерно 24 см.

Еще большие колебания могут вызываться резкими изменениями атмосферного давления, например, при прохождении циклонов над морем. Однажды над Черным морем во время сильной грозы удалось зарегистрировать сейши с размахом колебаний уровня воды 60 см.

Когда на протяжении водного бассейна укладывается половина длины волны, то пучности волны появляются по берегам и узловые линии находятся посередине моря. При сейшах море, в сущности, колеблется, как вода в тазу, если его покачать с боку

на бок, а потом оставить в покое. Легко обнаружить узловую линию посредине таза, в которой уровень воды остается постоянным, и линии пучностей по краям таза.

Если таз не только покачивать, но еще каким-либо образом привести во вращение вокруг вертикальной оси, проходящей через центр таза, то появится кориолисова сила и волна начнет как бы обегать стенки таза. Очевидно, узловая линия будет вращаться вместе с волной и неподвижной останется только одна ее точка. Такие точки неизменного уровня воды встречаются и в природных водоемах. Они называются амфидромическими точками. Например, три такие точки, определяемые направлением морских течений по отношению к направлению вращения Земли, существуют в Северном море: одна — неподалеку от берега Норвегии, другая — возле побережья Дании, а третья — между голландским берегом и восточным побережьем Англии.

Периоды сейшей можно определить, пользуясь формулой (13) и принимая, что длина бассейна L составляет полволны, то есть $\lambda/2$, а глубина равна D . Тогда на протяжении бассейна имеется только одна узловая линия или точка. Если число таких линий в сейше больше и, скажем, равно n , то период колебания воды составит

$$T = \frac{2L}{n \sqrt{gD}}$$

Такие стоячие волны с несколькими узлами или линиями узлов можно создать и в ванне, например, погружая и вынимая доску посредине ванны. Вместо узла в этом месте возникнет пучность волны, а поскольку на краях ванны должны тоже быть пучности, то узловые линии расположатся на расстояниях от ее стенок, составляющих $1/4$ и $3/4$ длины ванны. В свою очередь, можно нарушить покой воды и в этих узлах, тогда появятся четыре узла на равных расстояниях друг от друга. Ванна начнет «звучать» наподобие натянутой струны, с тем лишь различием, что на струне, пережимая ее пальцем, мы создаем узлы, и такие же узлы возникают на закрепленных концах струны, а в ванне мы создаем пучности, которые возникают также на ее концах. Поэтому картины стоячих волн на струне и в ванне при одинаковых соотношениях между длиной волны и размерами струны и ванны отличаются друг от друга по фазам на 90° .

Обычно сейши благодаря внушительным размерам водоемов имеют довольно большие периоды. Но иногда этот период составляет несколько минут, и тогда сейши начинают создавать определенную проблему в портах, расположенных на небольших водоемах. Например, в Лос-Анджелесской бухте значения L и D таковы, что могут возникать колебания воды с периодами в 12 и даже в 3 мин и меньше. Столь высокочастотные колебания не являются уже собственно сейшами, а получили название тягуна.

Горизонтальные перемещения частиц воды при тягуне могут достигать нескольких метров, и возникающие течения столь силь-

ны, что корабли срываются с прочных якорных цепей. Имея малые вертикальные смещения воды, тугун практически невидим. Можно наблюдать любопытную картину: на, казалось бы, совершенно спокойной воде корабли совершают сильнейшие колебательные движения по горизонтали, а то и поворачиваются вокруг якорной цепи, в зависимости от того, как они расположены относительно волны.

Наряду с такими долговременными и даже вовсе постоянными факторами возбуждения длинных волн на воде, как изменения атмосферного давления для сейшей или притяжение Луной и Солнцем для приливных волн, существуют и весьма кратковременные источники возникновения подобных волн. Это — землетрясения, извержения прибрежных и подводных вулканов и подводные взрывы.

В сущности с таких же по своему импульсному возбуждению волн мы начинали изучать само волновое движение — с волн, образованных падением камня в пруд. Но в пруду бегут безобидные и довольно короткие волны. В океане волны, вызванные подводным толчком, нередко имеют огромную длину волны и распространяются с высокой скоростью. Эти волны — цунами — часто несут с собой колоссальную энергию и, обрушиваясь на берега, вызывают катастрофические разрушения.

Наиболее часты землетрясения в районах, в которых все еще происходят горообразовательные процессы, особенно в Тихом океане, где они сопровождаются разломами океанского дна. От возникающих при этом гигантских волн издавна страдает Япония с ее густо заселенным восточным побережьем. В Японии такие волны исследуются довольно давно, и обиходное их японское название «цунами» стало международным. Однако любопытно, что в японском языке слово «цунами» означает просто «большая вода в гавани», или еще «прилив», хотя волны цунами по своему происхождению не имеют ничего общего с приливными волнами.

Дно Тихого океана у побережий Азии и Америки все время трясет, и цунами возникают сотнями и тысячами ежегодно. Но только немногие из них обладают такой энергией, что могут представлять собой опасность. Волнам цунами посвящено множество статей и книг, в которых приводятся подробности прихода цунами на заселенные побережья.

Примерно в XV веке до нашей эры произошло сильнейшее землетрясение в результате взрыва вулкана на одном из островов Средиземного моря неподалеку от острова Крит. Вместе с вулканом перестала существовать и погибшая под огромными волнами высокоразвитая цивилизация на Крите. Спустя тысячу лет, по свидетельству древнегреческого летописца, под волнами цунами погиб вместе со всеми своими жителями город Элис на берегу Коринфского залива. До нас дошли письменные свидетельства о десятке цунами, наблюдавшихся в течение первого тысячелетия до нашей эры.

С тех пор катастрофические цунами вряд ли стали чаще, но стали более населенными океанские побережья и существенно развились связь и печать, так что теперь человечество не оставляет без внимания ни один приход цунами умеренной, а тем более большой силы. Можно привести хотя бы краткий исторический список «выдающихся» цунами.

В 1575 году произошло землетрясение у берегов Чили. Огромная волна ворвалась в порт Вальдивию, затопила порт и город и выбросила на берег стоявшие в гавани корабли. 1 ноября 1755 года произошло знаменитое землетрясение в Лиссабоне, которое вызвало огромные волны высотой более 10 м. Полностью был разрушен испанский город Кадис, на который последовательно обрушилось 18 гигантских волн.

Под новый 1821 год сильное цунами пришло к побережью острова Сулавеси в Тихом океане. Водяная стена высотой более 20 м стерла с лица земли множество населенных пунктов, а стоявшие в гаванях суда забросила на несколько километров в глубь суши. 15 июня 1896 года гигантское цунами пришло к северо-восточному побережью Японии, вызвав в узких заливах волны высотой более 30 м, разрушив на побережье протяженностью в несколько сот километров более 10 тыс. зданий и погубив десятки тысяч человеческих жизней.

22 мая 1960 года сильнейшее землетрясение (в который уж раз!) произошло на побережье Чили. Одновременно с вулканическими извержениями, многочисленными сбросами и оползнями, страшными селевыми потоками на суше произошел значительный сдвиг пород на подводном склоне берега. Возникло цунами, и его грозную силу почувствовало на себе все побережье Тихого океана.

Море сначала резко отступило от берега — за считанные минуты на километр и даже более. Любопытные люди даже пошли за отступающей водой, обнажившей огромную поверхность дна, в поисках «даров моря». Затем послышался глухой рев, и к берегу с огромной скоростью понесся гребень гигантской волны. Высота его, по определению капитана судна, находившегося в море на безопасном расстоянии от берега, составляла не менее 15 м. Разрушения на берегу, вызванные землетрясением, довершила волна цунами, скрыв под водой то немногое, что еще осталось неповрежденным.

На побережье Чили были уничтожены десятки населенных пунктов. На побережье Новой Зеландии, Австралии, Филиппин города были затоплены более чем на метр. В портах США на побережье Тихого океана — Лос-Анджелесе и Сан-Диего — были разбиты причалы и потоплены десятки судов. В Японии, за 15 тыс. км от места возникновения цунами, волны достигали пятиметровой высоты.

Как это часто бывает, трагическое и здесь перемешено с комическим. В августе 1868 года канонерка военно-морского флота США стояла на якоре в бухте Арика на Тихоокеанском

побережье Южной Америки. В какой-то момент на бухту обрушилась чудовищная волна, которая перенесла корабль через весь город над крышами домов и опустила его на песок за милю от берега. Благодаря тому, что корабль имел плоское днище, он остался на ровном киле. Так он простоял несколько месяцев, пока не был продан на слом, ибо не было никакой возможности перенести его обратно в воду. Команда отделалась легким испугом, и после пережитого потрясения на корабле пошла повседневная морская служба, только с некоторыми сухопутными вольностями регламента. Самым важным нововведением было то, что шлюпки пришлось заменить ослими. Когда капитану канонерки требовалось сойти на «берег», боцман свистел в дудку и подавал команду: «Покинуть корабль!» После этого старшина шлюпки бежал к подъемной стреле, спускал трос и подтягивал осла к трапу, который пришлось удлинить, чтобы он доставал до земли. Капитан садился на осла и отправлялся по своим делам.

Другой случай произошел с человеком при исполнении им служебных обязанностей. Группа геодезистов составляла карту береговой линии неподалеку от Сан-Франциско для постройки будущего волнолома. Одному из участников группы было дано указание держать футшток — высокий мерный столб с делениями — все время у самого края воды. Внезапно вода отступила — это была первая ложбина волны цунами. Геодезист действовал сообразно инструкции и добросовестно двинулся с футштоком вперед. Как раз в тот момент, когда он начал недоумевать, зачем понадобилось тащить футшток на пару метров ниже уровня спокойной воды, направление движения воды вдруг изменилось на обратное, и усердный геодезист лихо прокатился на первом высоком гребне цунами.

Цунами далеко не всегда дает о себе знать заранее отступлением моря от берегов. Нередко без всякого предупреждения надвигается высокий гребень, который нелегко разглядеть далеко в море, особенно если он имеет небольшую высоту. В последние годы в большинстве стран, побережье которых подвержено нашествию цунами, созданы специальные службы предупреждения. Часто цунами приходит на побережье разных стран одновременно, имеет, так сказать, «международный» характер, и службы предупреждения увязываются в международную сеть. К участию в ее работе привлекаются и экипажи кораблей, которым «посчастливилось» первыми увидеть цунами в открытом океане.

Прогнозировать время прихода (и высоту волн) цунами к определенным участкам побережья чрезвычайно сложно, да и не всегда прогнозы получаются надежными. Дело в том, что еще недостаточно выяснена связь характеристик цунами с силой землетрясений, их видом, глубиной залегания их очага. Мало известно, как меняется высота волны цунами на первых километрах ее пути, как меняется скорость распространения волны по разным трассам в зависимости от рельефа океанского дна. А в океане могут быть и подводные хребты, и расщелины, на ко-

торых цунами испытывает дифракцию. И совсем уже трудно считать, как будет себя вести цунами непосредственно у берегов с их сложными очертаниями, бухтами и заливами.

Существенно затрудняет составление надежных прогнозов и то, что цунами часто являются нелинейными волнами, по крайней мере в течение первых минут своего существования. Другими словами, тогда высота волн может быть сравнима с их длиной. Это можно продемонстрировать, создав небольшое безобидное цунами в пруду. Для этого достаточно бросить в воду камень.

Что происходит в первые мгновения, наш глаз не в состоянии уловить, и приходится прибегать к скоростной киносъемке. Чтобы снимки получились более отчетливыми, можно пруд заменить либо бассейном с взвешенной в нем белой краской, либо даже просто кастрюлей с молоком.

В момент входа в воду камень образует в ней углубление. По краям этого углубления вверх выбрасывается корона из брызг. В следующий момент углубление начинает заполняться водой, и от места падения камня бежит фронт возмущения — ложбина первой волны. Заполнение углубления происходит с большой скоростью, врывающиеся в него струи воды сшибаются друг с другом, возникает эффект кумуляции, хорошо знакомый тем, кто имеет дело с взрывными работами. (Чтобы получить сильное разрушение, взрывные заряды располагают по окружности около заданного участка. Тогда эффект в центре окружности намного превысит тот, который получился бы, если в этом месте взорвать заряд с массой, равной суммарной массе всех зарядов на окружности.) Благодаря кумуляции в центре углубления вырастает высокий столб воды. Затем он спадает и разрушается, давая начало второму гребню волны, в то время как первый уже успел стойти, когда опали брызги по краям углубления. После этого вода в месте падения камня будет колебаться до тех пор, пока не истратит всей энергии, полученной от камня, на образование волн.

Как изменяется при этом амплитуда колебаний в разных точках поверхности воды и в разные периоды времени, можно видеть на рис. 26. На верхнем графике показано изменение смещения со временем в некоторой фиксированной точке. Видно, что амплитуда смещения постепенно нарастает, но растет и частота колебания и уменьшается его период, а значит, и длина волны. Это мы, как уже говорилось, наблюдаем и в действительности: сначала бегут длинные, а потом все более короткие волны. На нижнем графике показано изменение смещения в некоторый фиксированный момент времени для точек, находящихся на разном удалении от места падения камня. Видно, что волна, сосредоточенная около этого места, по мере его удаления расплывается и высота отдельных волн быстро падает. Это тоже легко наблюдать, например, сфотографировав волны от камня сбоку через прозрачную стенку сосуда.

Очень сложно движение частиц в таких волнах! Но мы уже

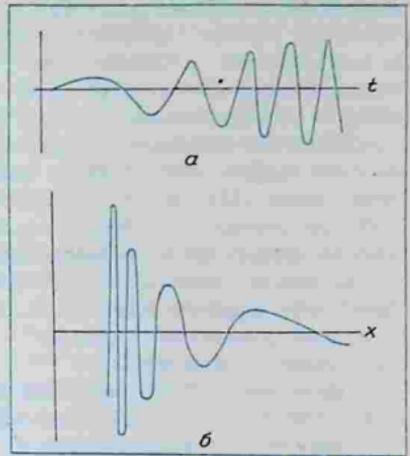


Рис. 26. Движение волн на воде от импульсного источника: а — смещения поверхности со временем в одной точке; б — смещения поверхности в разных точках в один момент времени

говорили, что положение можно радикально упростить, используя метод Фурье. Для этого достаточно предположить, что камень действует как источник волн всех длин и частот. Благодаря дисперсии скорость распространения отдельных фаз увеличивается с ростом длины волн и в результате возмущение воды, вначале сосредоточенное в одном месте, затем распадается на отдельные группы волн, движущихся каждая со своей скоростью. При этом по мере удаления от места падения камня эти группы волн постепенно уменьшают свою амплитуду.

Нечто подобное можно наблюдать во время возникновения и движения цунами, только происходит все еще сложнее. Если землетрясение (а лучше сказать, моретрясение) вызвало быстрое понижение дна, то на поверхность моря это возмущение выходит очень быстро, практически со скоростью распространения звука в воде (около 1500 м/с). Оно вызывает понижение уровня воды, и цунами бежит отливной волной вперед, которая и оказывает столь провоцирующее действие на любопытных людей. Если же при землетрясении дно повышается, то первым бежит гребень волны.

Высота цунами над эпицентром землетрясения зависит от той скорости, с которой происходит повышение или понижение дна. Обычно в открытом океане в месте своего зарождения цунами имеет небольшую высоту, не более 2 м. И лишь при катастрофических землетрясениях или извержениях вулканов, когда в воде перемещаются или в нее сбрасываются огромные массы пород (порой до десятка кубических километров!), высота цунами в эпицентре может достигать 5 м. Потому-то цунами часто не удается заметить в открытом море: они выглядят как плавные изменения уровня воды.

Длина волн цунами в области зарождения обычно близка к размерам очага возмущения. Здесь она может составлять лишь

несколько километров. Но по мере движения длина волны постепенно растет (сравните с рис. 26) и может достигнуть десятков и даже сотен километров. Даже самые глубокие участки моря оказываются для них мелководными, и скорость их движения определяется формулой (4).

Приняв среднюю глубину океана 5 км, по этой формуле можно найти, что цунами движутся со скоростью около 200 м/с, или около 700 км/ч. Такие же и даже еще большие скорости цунами имеют в действительности. Это позволяет им пересекать Тихий океан от американского до азиатского берега за 12 ч.

В море цунами неспособно нанести какой-либо вред кораблям: оно просто плавно поднимет и опустит корабль. Все свои зверские свойства цунами проявляет только на побережье и при подходе к нему.

Поскольку свою энергию цунами по дороге к берегам расходуют очень слабо, то, используя выражение для энергии (9), мы увидим, что при переходе с глубоководья на мелководье (уже настоящее, а не по отношению к длине волны!) их длины и высоты связаны простым соотношением

$$h_{\text{глуб}}^2 \lambda_{\text{глуб}} = h_{\text{мелк}}^2 \lambda_{\text{мелк}}$$

В свою очередь длины волн можно выразить через глубину дна. Так как частота волн неизменна, то λ пропорциональна скорости волны, то есть \sqrt{gD} , где D — глубина дна. Отсюда выводится соотношение, впервые полученное английским физиком Эйри:

$$\frac{h_{\text{мелк}}}{h_{\text{глуб}}} = \sqrt[4]{\frac{D_{\text{глуб}}}{D_{\text{мелк}}}}$$

Зависимость в степени $1/4$ — очень слабая. Например, если две величины различаются в сто раз, то $1/4$ степень их отношения составит всего лишь около 3.

Но если у берега море имеет глубину, скажем, 5 м, а средняя глубина моря, из которого пришло цунами, составляет 5 км, то его высота вырастает почти в 6 раз. И незаметная в море двухметровая волна превратится в грозную 12-метровую, а катастрофическая 5-метровая действительно оправдает свое название, поднявшись до высоты десятиэтажного дома.

Но так будет на открытом побережье. В заливе, суживающемся в мелкой части, опасность волны цунами еще более возрастает. Если ширина залива в глубокой части составляет $b_{\text{глуб}}$, а в мелкой — $b_{\text{мелк}}$, то цунами дополнительно вырастет в $(b_{\text{глуб}}/b_{\text{мелк}})$ раз. Ко всему еще, если полоса мелководья у побережья вытянута в длину, то она действует подобно собирающей линзе, благодаря рефракции фокусируя волны цунами на отдельных участках берега. Естественно, что при этом высота и разрушительное действие волн (а энергия разрушения пропорциональна энергии волны, то есть квадрату ее высоты и только первой степени длины) сильно возрастает.

Цунами могут быть вызваны не только землетрясениями, но и, например, циклонами и тайфунами. Правда, в этих случаях грозное название волн смягчают, называя их уже не цунами, а барическими волнами, то есть волнами, вызванными глубокими и быстрыми изменениями атмосферного давления. От них особенно страдают японские острова и населенные пункты, расположенные на берегах Бенгальского залива. Здесь барические волны могут достигать высоты более 10 м и вызывать катастрофические штормовые нагоны воды.

Цунами возникают также при подводных и надводных взрывах большой мощности, в частности при испытаниях атомных и водородных бомб. От надводного взрыва, как и от падения камня в воду, первой бежит отливная, а за нею уже приливная волна. Высота волны по мере удаления от центра взрыва меняется обратно пропорционально расстоянию в первой степени, то есть как $1/R$. Это значительно быстрее, чем в случае линейных круговых волн, у которых, как мы помним, высота меняется в отношении $1/\sqrt{R}$.

В 1954 году американцы произвели под водой испытание водородной бомбы мощностью, эквивалентной 100 000 т тротила. Спустя 12 с после взрыва первая волна ушла на полкилометра, имея чудовищную высоту — 54 м. А когда она удалась на полтора километра, ее высота составляла только 13 м. Из этого можно заключить, что и здесь высота волны менялась примерно обратно пропорционально расстоянию от места взрыва.

Интересно также, что регулярности в высотах первой и последующих волн, вызванных подводным взрывом, не наблюдается. Третья волна, например, может оказаться выше второй, десятая — выше пятой и т. п. Впрочем, и в волнах цунами «естественного» происхождения тоже не установлено строго закономерного падения высоты волн с увеличением их номера в цуге.

Иногда цунами возникает не в виде цуга волн, а в виде одной-единственной волны, то есть солитона. Солитоны, как и другие виды цунами, могут иметь не только подземное, но и надземное происхождение. Например, они могут быть вызваны циклонами. Если циклон долго стоит на одном месте, то он успевает вызвать заметное вспучивание поверхности моря. Этому способствуют и ветры, сгоняющие воду к центру циклона. После ухода циклона вспученная поверхность оседает, и по воде бежит во все стороны солитон. Скорость его движения тем выше, чем больше его высота.

Солитоны, по-видимому, несут ответственность за знаменитые ленинградские наводнения. Циклоны часто застаиваются в Балтийском море, где вследствие низкого давления создают довольно большое поднятие уровня воды вокруг своего центра. Затем циклон и вместе с ним солитон трогаются в путь. Входя в узкий Финский залив, солитон увеличивает свою высоту и, нагоняя воду в Неву, затопляет город.

ВЕТЕР И ВОЛНЫ

Но среди бешеных валов
Есть тихая волна — пасата,
Как среди грома каблуков
Стопа неслышная босая.

А. Вознесенский

Могущество человека за последние века выросло неизмеримо. Но он все еще часто незащищен перед угрозой морских волн. Каждый год во время штормов гибнет много судов и среди них даже корабли, спроектированные и оснащенные по последнему слову техники. Поэтому понятен большой размах, с которым исследуются морские волны.

«Нет ничего практичнее хорошей теории». Эти слова в полной мере можно отнести к физике так называемых ветровых волн. Она опирается на крепкий фундамент тысячелетних наблюдений за морскими волнами. Казалось бы, давно пора ей иметь и столь же надежный теоретический фундамент.

Увы, он-то как раз еще только возводится. Теория ветровых волн начала создаваться еще в прошлом веке, но и поныне она далека от завершения. Долгое время она не могла дать ясного ответа на главный вопрос: почему едва заметная ветровая рябь вырастает в огромные и притом нерегулярные волны? Впервые правильное физическое объяснение нарастания ветровых волн, по-видимому, предложил полвека назад советский ученый В. М. Маккавеев, и с тех пор на этом пути удалось достичь заметных успехов.

Действительно, первое, что поражает нас и, конечно, создает большие трудности для изучения, — это чрезвычайная неупорядоченность, нерегулярность штормовых волн в открытом море. Валы имеют совершенно различную форму, которая к тому же каждую секунду меняется. Она несколько не напоминает привычную нам синусоиду: гребни заострены, склоны изрыты более мелкими волнами, ветер сгоняет с гребней каскады брызг. Между острыми гребнями пролегают длинные ложбины, покрытые пенными полосами. Волны приходят то справа, то слева, то по носу судна. Вдруг после сравнительно невысоких волн появляется несколько особенно высоких, а одна из них, совсем уже высокая и крутая, заслонившая собой горизонт, — «девятый вал» — может, сорвавшись, обрушиться на несчастное судно. Как разобраться в этом грозном хаосе? Есть ли в нем какие-нибудь закономерности, за которые могла бы «ухватиться» теория?

Некоторые основания для поиска закономерностей давали многолетние, хотя и несистематические наблюдения за волнами, которые проводили мореплаватели. Сначала такие наблюдения велись на глазок, а каждый представляет себе, как трудно на

беспреданно качающемся судне определить истинную высоту волн. Затем появились приборы для измерения высоты волн, стали создаваться специальные научные экспедиции для изучения морского волнения, наконец, в море вышли хорошо оборудованные научно-исследовательские суда. Было накоплено много объективных данных о характере ветровых волн.

Однако наблюдения за морскими волнами в природных условиях были и продолжают оставаться трудными. Чтобы выделить те или иные явления в более или менее чистом виде, что должно облегчить их изучение, физики ставят эксперименты. Для проведения экспериментов с морским волнением уже в нашем веке были построены специальные установки — штормовые бассейны.

Один из таких бассейнов в нашей стране находится в Крыму недалеко от Симеиза, в поселке Кацивели. Инициатором его создания был советский физик академик В. В. Шулейкин. Здесь он и его ученики получили много важных экспериментальных данных о возникновении и развитии штормовых волн и на их основе, следуя идеям В. М. Маккавеева, разработали ряд теоретических положений, серьезно обогатили физику волн.

Идея бассейна, в сущности, довольно проста. Ветер разгоняет волны в море на протяжении сотен и тысяч километров. (Кстати, слова «разгонять волны» в общем-то не очень точны, но наглядны и потому привились в нашем языке. Мы будем тоже использовать их, а об их неточности скажем несколько дальше более подробно.) Конечно, строить прямолинейный бассейн такой протяженности бессмысленно, а в коротком бассейне не удастся увидеть ничего существенного. Поэтому исследователи поступили так, как и их коллеги, которые занимались получением элементарных частиц высокой энергии. Ведь сначала были построены прямолинейные ускорители частиц, а потом их стали сворачивать в кольца — в кольцевом ускорителе удлинялся путь разгона частиц. Так родились синхрофазотроны; аналогичную им внешнюю форму имеют и штормовые бассейны.

Движение воздуха над поверхностью воды, налитой в кольцевой бассейн, создается мощными воздуходувками. Стенки бассейна сделаны стеклянными, и специальные фотоаппараты фотографируют появляющиеся волны в профиль. Для точных измерений профиля на стенки нанесена шкала. Грубые деления ее образуются самой металлической арматурой бассейна, а мелкие нанесены на стеклянные стенки.

Зайдем в бассейн и сядем возле его стенки примерно на высоте спокойной воды. Вот оператор включил воздуходувку, и мы начали наблюдения. Вскоре после того как появился ветер, поверхность воды покрылась мелкими волнами. Это — гравитационно-капиллярные волны с длинами примерно от 1 до 10 см.

Возникают, однако, не одни только волны. Впустим в бассейн в каком-то одном месте небольшую порцию красящего вещества. Мы увидим, что появилось и ветровое течение: крас-

ка постепенно перемещается по ходу ветра. Мало-помалу ветровое течение распространяется с поверхности в нижележащие слои воды: краска, имеющая ту же плотность, что и вода, перемещается ко дну бассейна.

Отвлечемся на минуту от наблюдения и зададим простой вопрос: а почему вообще волны на воде возникают при движении воздуха? Исключим всякие мелкие сотрясения фундамента бассейна, вызванные, например, работой электродвигателей в воздуходувках. Будем считать также, что поверхность воды вначале идеально гладкая. Воздух над водой движется параллельно ее поверхности, трение воздуха о воду совершенно ничтожно. Так откуда возьмется волнам?

Оказывается, одна из причин заключена в самом потоке воздуха. Сделаем его видимым (с помощью дыма, например), и нам наглядно представится его неоднородность: мы различим, как в потоке у самой поверхности воды бегут маленькие вихри воздуха, а по мере удаления от поверхности они приобретают все большие размеры.

Вихри у поверхности воды тоже неодинаковы по своим размерам и следуют друг за другом без строгой периодичности. Но это не столь существенно. Важнее другое: при прохождении каждого такого вихря уменьшается давление воздуха над водой, и ее поверхность вдоль трассы вихря образует волну вспучивания. Этого достаточно: теперь ветер получает плацдарм для воздействия на поверхность воды.

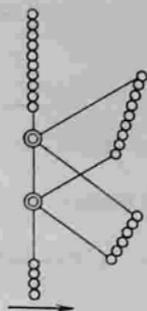
Посмотрим, что происходит на небольшом участке этого плацдарма (рис. 27). Выберем на гребне волны четыре частицы и допустим, что ветер дует слева. Волна соответственно распространяется вправо, и частицы 1 и 2 движутся по своим орбитам вниз, а частицы 3 и 4 — вверх. (Пока волны имеют малую длину, бассейн представляет для них глубокую воду, а траектории частиц на глубокой воде, как мы помним, имеют вид окружностей.) Воздух, естественно, давит на левый склон гребня сильнее, чем на затененный гребнем правый его склон, то есть сила, действующая на частицы 1 и 2, больше силы, действующей на частицы 3 и 4. Ветер как бы прогибает, вдавливает частицы на левом склоне волны. Разница в давлениях приводит к тому, что ветер нагнетает энергию в волну. Отнимая некоторую энергию у поднимающихся частиц, он передает ее опускающимся частицам, и в результате возникает поток энергии в волне.

На самой волне определить поступающую в нее энергию за один оборот частицы по своей орбите очень трудно. Поэтому из твердого материала изготовили модель синусоидальной волны, продули ее в аэродинамической трубе и произвели соответствующие измерения. Оказалось, что мощность, поступающая от ветра, пропорциональна высоте волн, крутизне их и квадрату относительной скорости ветра (то есть квадрату разности скорости ветра и фазовой скорости волн); вместе с тем она обрат-



Рис. 27. Движение частиц воды на гребне ветровой волны

Рис. 28. «Выталкивание» частиц воды при движении волны



но пропорциональна их периоду. Значит, чем меньше фазовая скорость при данной скорости ветра, тем быстрее поступает в волны энергия. Но поскольку фазовая скорость пропорциональна длине волны, то это означает, что вначале мощность от ветра поступает главным образом в короткие волны.

Действительно, такие волны образуются первыми. Поскольку наибольшую мощность от ветра отбирают те из них, что имеют наибольшую высоту, то волнам «выгодно» быстро расти в высоту, оставаясь достаточно короткими. Что же, проверим это: включим воздухоудку и продолжим наблюдения за развитием волн. Так оно и есть: скажем, у волн длиной 10 см высота быстро нарастает примерно до 1 см. Но затем рост высоты замедляется, и при высоте, составляющей примерно $\frac{1}{7}$ длины волны, вовсе приостанавливается.

Что произошло? Придется опять отвлечься и проследить за движением отдельных частиц (рис. 28). Возьмем две частицы — одну на поверхности, а другую на некоторой глубине — и разместим между ними «вплотную» несколько промежуточных частиц. Мы помним, что описываемые ими окружности уменьшаются в размерах при «погружении» частиц. По мере того как обе частицы, двигаясь по своим орбитам, переходят в положение, все более удаленное от исходного, между ними помещается все меньшее число частиц. Поскольку сами частицы несжимаемы (это отражает факт несжимаемости воды), значит, лишние частицы должны выталкиваться со своих орбит вправо — в направлении движения волны. Ток вытолкнутых частиц и есть, в сущности, ветровое течение воды, накладывающееся на ее волновое движение.

Но тогда не проще ли суммарное движение частиц не делить искусственно на два движения, а считать, что частицы совершают единое движение: не вращаются по замкнутым окружностям, а с каждым оборотом немного смещаются вперед по ходу волны? Другими словами, нужно разомкнуть орбиты частиц. Их даже не надо полностью распрямлять: достаточно, чтобы частицы хотя бы чуть-чуть смещались вперед после каждого оборота.

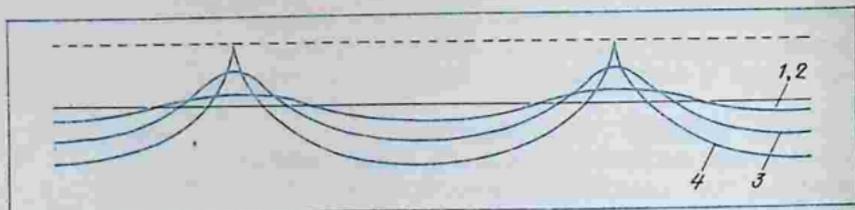


Рис. 29. Моделирование формы ветровых волн с помощью точек на ободке катящегося колеса

Но теперь форма волны перестает быть чисто синусоидальной. Помните «историческое происхождение» синусоиды от вращательного движения шарика? Так вот, для получения разомкнутой траектории движения шарика теперь придется еще медленно перемещать и сам вращающийся столик, на котором укреплен шарик. Вместо того чтобы наблюдать за шариком с помощью такого сложного приспособления, возьмем более наглядную модель — автомобильное колесо. Оно не только вращается, но еще и движется вперед.

Нанесем на обод колеса четыре точки — одну в центре обода, другую чуть отступя от центра, третью еще дальше и, наконец, четвертую на самом краю колеса. Развертка движения первой точки даст, очевидно, прямую линию (рис. 29). Развертка второй будет выглядеть очень похожей на синусоиду. Это понятно: колебания положения этой точки относительно прямой малы по сравнению с полной длиной пути, который колесо пройдет за один оборот.

А дальше начнутся интересные вещи. Посмотрите на развертку движения третьей точки. На ней сужившиеся, но еще довольно пологие горбы отделены друг от друга гораздо более длинными впадинами. И наконец, на развертке для четвертой точки горбы заострились до предела.

Мы получили графики, которые чрезвычайно напоминают форму волн, наблюдаемых в открытом море при несильном волнении: недаром волну именно такой формы нарисовал сын рыбака на рис. 1. Третья кривая называется трохойдой, а четвертая — циклоидой. В отличие от синусоидальных волн их называют волнами конечной высоты. Действительно, их высота составляет уже значительную долю длины волны (расстояния, пройденного колесом за один его оборот).

Присмотримся внимательнее к циклоиде. Легко понять, что настоящая волна в природе не может иметь гребень такого профиля. Вершина его бесконечно узка, так что на ней может разместиться только одна частица, причем она не будет описывать не только круговой или разомкнутой, но и вообще никакой орбиты: она лишь замрет на вершине в неподвижности. Это означает, что циклоидальный профиль волны — предельная, уже недостижимая для реальной волны форма. Приняв ее, волна

Рис. 30. Разрушение штормовой волны



становится абсолютно неустойчивой и должна мгновенно разрушиться.

Каково же отношение ее высоты к длине? Очевидно, оно равно просто отношению радиуса к длине окружности:

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{6,28}.$$

Это отношение довольно близко к тому, равному $1/7$, при котором рост волн в бассейне приостановился. Как показывает более строгий расчет, волна должна стать совершенно неустойчивой еще немного раньше, когда угол, образуемый склонами горба при его вершине, достигает 120° . Такому углу «естественного откоса» волны и отвечает отношение $h/\lambda = 1/7 = 0,143$.

Конечно, волна — не кучка песка, которая начинает рассыпаться, когда ее крутизна достигнет предельной величины. Песчинки в кучке удерживает трение, а горб волны поддерживает коллективное, эстафетное движение частиц воды. И все дело в особенностях этого движения. В трохойде ложбины волн длиннее, чем горбы, потому что в ложбине скорость движения частиц направлена против движения волны, а на гребне — вдоль ее движения (см., например, рис. 27). Горб, естественно, заостряется тем больше, чем ближе скорость частицы на гребне к скорости распространения волны. В тот момент, когда обе они сравниваются, наступает предел, поскольку частица в волне, естественно, не может двигаться быстрее самой волны. Волна становится неустойчивой, и гребень ее разрушается (рис. 30). Но часто не целиком: с волны слетают только наиболее быстрые частицы на самом верху гребня. Именно эти частицы штормовой ветер сдувает с волн.

В море опасны не просто высокие, а именно предельно крутые волны. Разбиваются они, конечно, не потому, что встретили корабль. Какое препятствие представляет для волны высотой 20—30 м и с широким фронтом, скажем, небольшое парусное судно, почти ничего не весящее на воде, да вдобавок еще идущее носом к волне? Просто сама волна в этот момент или незадолго до него потеряла устойчивость, и частицы, находившиеся на ее горбе, стали поступательно двигаться со скоростью, большей скорости волны. Это уже встреча корабля не с регулярной волной, а, по существу, с ударным потоком. Корабль ведет себя так, словно натолкнулся на преграду, которая нехотя расступилась перед ним и обрушила на него тонны воды, находившейся раньше в гребне.

К сказанному остается добавить, что трохгоидальные волны на глубокой воде, как показал австрийский физик Герстнер еще в 1802 году, могут распространяться, не изменяя своей формы, подобно синусоидальным волнам. Более того, и фазовая скорость их распространения такая же, как у синусоидальных волн.

Снова вернемся в штормовой бассейн и продолжим наблюдения. Мы увидим, что высота волны h , когда достигнуто предельное отношение ее к длине волны, продолжает расти. Но одновременно с этим растет и длина волны, причем так, что в некотором диапазоне λ отношение h/λ остается постоянным и почти равным предельному. Чем меньше скорость ветра, тем уже этот участок постоянства h/λ , а при малых скоростях он может вообще не возникнуть.

Затем по мере развития волн обнаруживается интересный факт: рост высоты волн начинает отставать от роста их длины, причем чем дальше, тем все больше. Отношение h/λ начинает постепенно уменьшаться, доходит примерно до $1/25$, затем это уменьшение и вовсе прекращается.

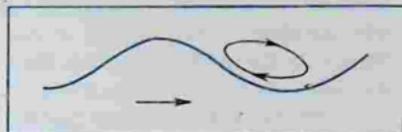
Все это выглядит очень загадочно. Почему прекратился рост h/λ , кажется, уже понятно: волна стала неустойчивой, а неустойчивые волны сколько-нибудь длительное время существовать не могут, они разрушаются. Но почему начала расти длина волны? Ведь чем больше длина, тем больше скорость распространения волны, тем ближе она к скорости ветра, а значит, тем меньшую энергию ветер может ей передать. Волна, движущаяся со скоростью, равной скорости ветра, не будет получать от него энергии. А о разгоне волн, движущихся быстрее ветра, вообще бессмысленно говорить. И наконец, почему волны с ростом своей длины не остаются на пределе возможной высоты, что опять-таки «выгодно» в смысле питания энергией ветра, а начинают уменьшать свою крутизну?

До сих пор мы считали, что волне передается вся энергия от источника и эта энергия сохраняется в ней все время ее движения, то есть, по существу, пренебрегали внутренним трением частиц воды, ее вязкостью. Между тем энергия волны постепенно уменьшается, даже если волна не чувствует дна, не испытывает трения о дно и на ее пути нет никаких препятствий, на которых она могла бы рассеиваться. Причина уменьшения энергии волн — внутреннее трение в воде.

Вначале, когда волны только-только начинают образовываться, потери на трение практически незаметны. Однако с ростом мощности, передаваемой ветром воде, в ней возникает сильное турбулентное, вихревое течение. В отличие от воздушных вихрей, которые помогали рождению волны, вихри в воде приостанавливают развитие волн. Энергия вихрей в конечном итоге переходит в тепло: море в бурю теплее, чем в штиль.

Как показывают расчеты, турбулентное трение пропорционально квадрату высоты волн, квадрату крутизны их и обратно пропорционально периоду волн. Поступление же энергии ветра

Рис. 31. Возникновение присоединенного вихря за гребнем волны



в волну пропорционально высоте и крутизне волн и обратно пропорционально их периоду. Из сопоставления зависимостей видно, что по мере нарастания высоты и крутизны волн в конце концов должен наступить такой момент, когда дальнейший рост этих величин становится «невыгодным» и должен замедлиться, а затем смениться уменьшением.

Длинные пологие волны теперь, пусть не так эффективно, как более крутые и короткие волны раньше, отбирают энергию у ветра. Но зато они и меньше расходуют ее на турбулентное движение. Как уже сказано, отбор мощности у ветра пропорционален первой степени крутизны волн, а потери ее на трение — квадрату этой величины. Так что в конечном итоге «выгоднее» пологие волны, а значит, при данной их высоте — более длинные. Тогда наступает равновесие: сколько энергии волны теперь отбирают у ветра, столько же они расходуют ее на трение. Так возникают установившиеся волны.

В области шторма присутствуют волны с самыми разными длинами, а между ними идет своеобразная конкуренция за источник питания энергией. Более короткие волны в глубоком море движутся медленнее, чем длинные. Поэтому относительная скорость ветра над ними больше, чем над длинными волнами. Естественно, они будут нарастать быстрее, чем длинные волны. Но достигая предельной высоты, они разрушаются. Энергия, которую они теряют при разрушении, передается длинным волнам, и в конечном итоге львиную долю энергии ветра захватывают именно длинные волны. Короткие волны в шторм, как легко убедиться непосредственно, — эфемерное, быстро сменяющее свою картину явление, тогда как в длинных волнах намного больше постоянства.

Очень сложная картина! Но она усложняется еще более если учесть, что не только ветер действует на волны, но и волны в свою очередь, могут, как и любое препятствие, воздействовать на воздушный поток. Теория и эксперименты в аэродинамической трубе при обдувании твердых препятствий показывают, что достаточно уже очень пологого гребня (с углом при вершине около 6°), чтобы за его подветренной стороной движение воздуха стало турбулентным. Там возникает так называемый присоединенный вихрь, который обтекает впадину волнообразного препятствия (рис. 31).

Возле поверхности воды у впадины движение воздуха в этом вихре, как легко видеть, совпадает по направлению с движением частиц воды во впадине. А это, в свою очередь, может стимулировать увеличение высоты гребней, особенно если пуль-

сации давления ветра у воды благодаря вихрям попадают в резонанс с волной. Некоторые ученые вообще склонны считать, что развитие ветровых волн происходит не в результате напора воздуха на наветренные склоны волн, а именно вследствие описанных колебаний давления воздуха в турбулентном потоке у подветренных склонов волн.

Математическое оформление этих идей чрезвычайно сложно и далеко еще не доведено до конца. Поэтому для дальнейшего описания того, как развиваются ветровые волны, мы используем результаты более простой теории ветрового напора.

Что в сущности требуется от хорошей «практической» теории развития ветровых волн? Чтобы она давала возможность предсказывать характеристики ветрового волнения в любой момент времени после начала действия ветра и на любом участке моря, в том числе вблизи берегов, в бухтах, где находятся порты. И не только в морях, но и в обширных мелководных озерах, по которым осуществляется интенсивное судоходство.

Тут возможны два подхода.

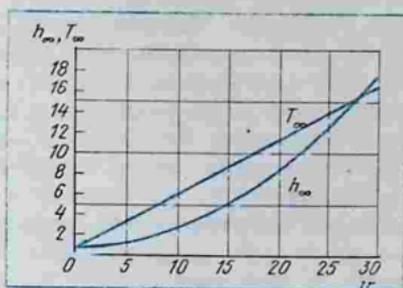
При первом подходе пытаются рассчитывать характеристики средних регулярных волн, основываясь на понимании механизма накачки ветром энергии в волны и механизма, которым приобретенная волнами энергия тратится в турбулентном движении воды. Такую теорию можно назвать энергетической, поскольку в ней рассматривается обмен энергией между атмосферой и океаном.

Второй подход — статистический. В нем взаимодействие ветра и волн рассматривается как случайный процесс и отыскиваются «законы случая». Эти законы характеризуют распределение энергии между волнами различных высот и длин также в зависимости от длительности работы ветра и расстояния, которое пробежали волны от места своего зарождения. Зная такие распределения, полученные в большом числе наблюдений, можно предсказывать и средние характеристики ветрового волнения.

На оба эти подхода физика издавна опирается, изучая другой круг явлений. Например, можно, по крайней мере в принципе, зная закономерности передачи тепловой энергии от одного тела к другому, установить, как будет вести себя газ при нагревании. Таким путем идет термодинамика. Но можно определить характеристики газа, изучая статистику столкновений его молекул, во время которых они обмениваются своей энергией. Это — путь статистической механики, или, как ее еще называют в данном случае, кинетической теории теплоты.

Энергетическая теория обладает некоторым преимуществом благодаря сравнительной простоте ее расчетов, которые основываются на наблюдении за развитием ветровых волн в контролируемых условиях — в штормовых бассейнах. Рассмотрим, например, график (рис. 32), на котором показано, как зависят от скорости ветра предельные высота h_{∞} и период T_{∞} волн. Индекс у этих величин означает, что они достигаются за бесконечно дол-

Рис. 32. Зависимость предельных высоты и периода ветровых волн от скорости ветра. По оси ординат отложены h_{∞} в метрах и T_{∞} в секундах, по оси абсцисс — скорость ветра в метрах в секунду



гое время действия ветра, дующего с постоянной скоростью в одном направлении.

Не надо удивляться, что по оси абсцисс отложена абсолютная, а не относительная скорость ветра (разность между скоростью ветра и фазовой скоростью волн). Дело в том, что сама фазовая скорость зависит от длины волны на глубокой воде, а длина волны растет со временем, пока не достигает предельного значения λ_{∞} , равного примерно $25 h_{\infty}$. Поэтому фазовая скорость предельно разившихся волн составляет определенную и притом одну и ту же долю скорости ветра, а именно 82% от этой скорости. Такое заключение подтверждается наблюдениями и в бассейне, и в штормовом море.

Простым расчетом по формулам, приводившимся в первой главе, легко найти, что период T_{∞} волн в секундах равен почти половине значения скорости ветра в метрах в секунду, то есть линейно зависит от v , что и показано на графике. Высота же волн зависит от скорости ветра квадратично: например, из графика видно, что при скорости ветра 15 м/с волны могут достичь высоты 4,3 м, а при вдвое большей, $v = 30$ м/с, — учетверенной высоты $h_{\infty} = 17,2$ м.

Далее, теория показывает, что максимальная длина установившейся волны возрастает в условиях неограниченной продолжительности действия ветра в 114 раз по сравнению с той, когда волны имели наибольшую крутизну — когда было $h_0/\lambda_0 = 1/7$. Поскольку в пределе $h_{\infty}/\lambda_{\infty} = 1/25$, то получается, что

$$\frac{h_{\infty}}{h_0} = \left(\frac{h_{\infty}}{\lambda_{\infty}} / \frac{h_0}{\lambda_0} \right) \frac{\lambda_{\infty}}{\lambda_0} = \left(\frac{1}{25} / \frac{1}{7} \right) \cdot 114 \approx 32,$$

то есть высота установившихся волн превышает их высоту на стадии наибольшей крутизны не более чем примерно в 32 раза.

Но ветер никогда не дует неограниченно долго, с постоянной скоростью и притом в одном направлении. Нужно еще учитывать, что длина, на которой разгоняются волны в море, тоже не бесконечно велика — это не штормовой бассейн. И все же устойчивый ветер, дующий в течение нескольких часов, а порой и суток, над океанскими просторами вдали от берегов, встречается не так уж редко. Получив расчетом картину развития волнения в таком режиме, ее нетрудно обобщить и на случаи, когда

ветер меняет свою скорость и даже направление, как, например, при тайфуне. Нужно лишь использовать некоторые простые физические соображения. Скажем, ясно, что ветер, дующий под острым углом к волнам, производит меньший напор, чем дующий вдоль хода волн. Если этот угол достигает 90° , то ветер не должен влиять на волны. Если же этот угол становится тупым, то, естественно, ветер начинает постепенно гасить волны, стремясь повернуть их движение в обратную сторону. Наибольшее гасящее действие ветер, разумеется, оказывает, если он дует точно навстречу волнам. Однако волны обладают огромной инерцией, и для того, чтобы их погасить, встречный ветер должен дуть не меньше время, чем дул попутный ветер такой же силы, вызвавший волнение.

Надо учитывать и то, что волны не стоят на месте. Они движутся вперед, причем скорость их постепенно возрастает с увеличением длины волны, хотя, естественно, остается все время меньше скорости ветра. Ветер, обгоняя волны, зародившиеся в месте шторма, как бы готовит им встречу. Чем дальше от начальной наветренной границы шторма, тем более сильное волнение встретят приходящие волны. С подветренной же стороны в штормовую зону входят сравнительно невысокие волны, которым предстоит еще развиться.

Ясно, что наблюдаемая картина волн должна зависеть не только от времени работы ветра, но и от того, где находится место их наблюдения по отношению к наветренной границе шторма. Это расстояние нередко называют, хотя и не вполне удачно, длиной разгона волн. Некоторое оправдание термину можно найти лишь в том, что скорость волн по мере их движения под действием ветра действительно растет. В конце концов установившуюся скорость, и, если ветер останется постоянным, далее она уже не будет меняться. Вся энергия, накачиваемая теперь ветром в волны, будет расходоваться на турбулентное движение частиц воды.

Речь может идти только о том, хватит ли волнам пройденного до берегов расстояния, чтобы успеть развиться в полную силу. Легко заметить, что сколько бы ни дул даже сильный ветер с берега, он никогда не развевет у берега крупную волну: она появится только вдали от него. Ясно, что чем меньше скорость ветра, тем большая длина разгона потребует волнам, чтобы развиться до установившегося состояния.

Мы не будем приводить графиков, по которым производятся соответствующие расчеты высоты, длины и периода волн, вызванных ветром. Достаточно популярное описание графиков и того, как пользоваться ими, приведено в хорошей книге академика В. В. Шулейкина «Очерки по физике моря».

Покажем лишь один график изменения высоты волн при прохождении тихоокеанского тайфуна (рис. 33). Этот случай, как известно, имеет ту характерную особенность, что ветер в

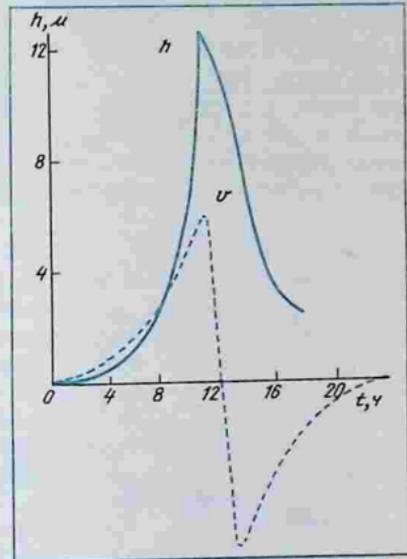


Рис. 33. Изменение высоты волн при прохождении тайфуна

данной точке моря постепенно нарастает до максимальной величины и очень быстро стихает, когда подходит «глаз» тайфуна. После этого ветер вновь быстро возрастает до максимума, но дует уже в противоположном направлении, так что начинает гасить волны. Затем ветер постепенно стихает, и море начинает успокаиваться. Из графика видно, что скорость ветра в тайфуне нарастала в течение 11 ч, достигнув 60 м/с. Потом она быстро упала до нуля и столь же быстро возросла до того же значения, но только в противоположном направлении, а затем, также в течение 11 ч, медленно снизилась до нуля. На том же графике показана и динамика роста высоты волн. Можно заметить, что высота волн сначала отставала от ветра по быстроте своего нарастания, потом начала опережать ее и, достигнув 12,5 м, из-за встречного ветра постепенно уменьшилась.

Очевидцы утверждают, что зрелище сшибающихся волн чудовищной высоты при абсолютном безветрии еще страшнее, чем когда волны набегают на судно среди рева и грохота урагана. Следует заметить, что 12 м — это достаточно большая высота волн. Чтобы волны такой высоты могли развиваться при очень крепком ветре (8 баллов по шкале Бофорта), потребуется несколько суток. Даже просто крепкий ветер (7 баллов) может за такое время развить очень высокие и опасные волны.

До сих пор речь шла о регулярных волнах, которые никогда не наблюдаются во время штормов и ураганов. Реальные штормовые волны представляют собой в сущности весьма прихотливо наложенные друг на друга элементарные волны разных длин, высот, фаз и направлений (рис. 34). Для них теряют точный

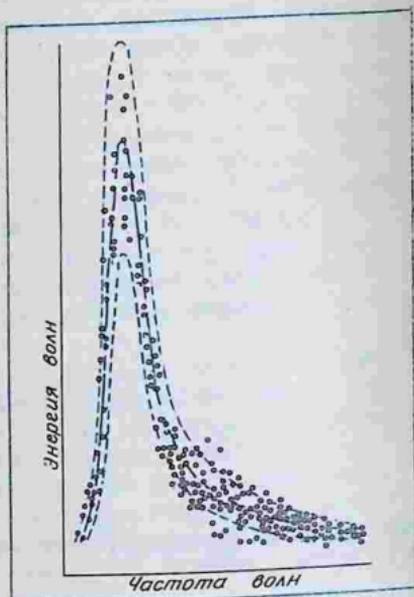
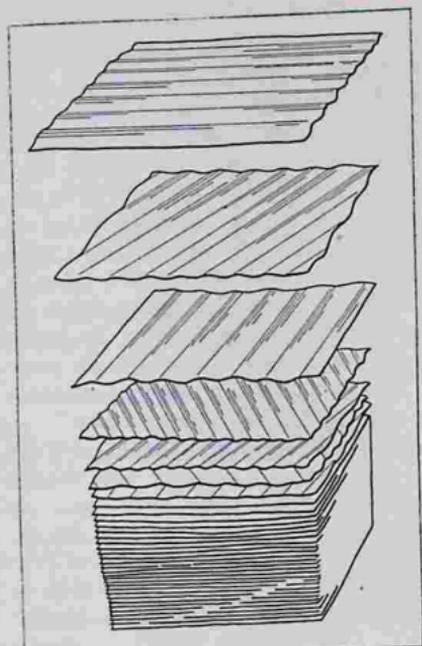


Рис. 34. Сложение «элементарных» волн в ветровой волне

Рис. 35. Спектр энергий ветровых волн в небольших морях. Сплошная кривая обобщает данные измерений, пунктирные кривые очерчивают верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала

смысл такие характеристики, как период, длина волны, скорость распространения. Сложение всех этих синусоид происходит по законам случая. Это позволяет применить к описанию характеристик нерегулярных морских волн статистику.

Но еще до обращения к статистике ясно, что в одном месте и в одно время могут случайно встретиться несколько слагающих волн, идущих с разных направлений, и тогда на короткое время возникнет высокая, но неустойчивая волна. Может случиться и так, что несколько протяженных верениц волн случайно будут двигаться в одном направлении, причем их длины окажутся близкими друг к другу. Тогда появится особенно высокая группа волн, в которой один или два гребня могут оказаться вовсе выдающимися и в прямом смысле, и по последствиям для корабля, если он окажется на их пути.

Словом, легенда о «девятом вале» имеет под собой основания. Ведь она родилась, очевидно, не на пустом месте, а как обобщение многовекового опыта плавания (и кораблекрушений) на морях и океанах. Впрочем, некоторые опытные мореплаватели вместо девятого называли и седьмой, и более редкие

валы. Статистическая обработка наблюдений, сделанных уже не на глазок, а с помощью точных приборов, показывает, что в любой выбранной совершенно случайным образом группе штормовых волн высота одной волны из 23 превосходит среднюю высоту в два раза, а одной из 1175 — в три раза. Если иметь в виду, что расчеты по энергетической теории дают для средней высоты в реальных условиях значения до 10 и более метров, то не должны показаться фантастическими утверждения очевидцев о том, что при ураганах встречаются отдельные волны высотой более 30 м.

Статистика ищет закономерности в случайном, а затем пытается подвести под них физические основания. Так, например, мириады молекул в некотором объеме газа движутся совершенно хаотически — по различным направлениям и с разной скоростью, однако средняя скорость их движения характеризуется вполне определенной величиной, однозначно связанной с температурой газа. Статистика волн показывает, что в них тоже существуют отчетливые закономерности, но физическое объяснение им еще не найдено. Движение волн — это не простое движение молекул: образование, развитие и распространение волн описывается намного более сложными законами. Волновое движение в отличие от движения отдельных частиц коллективное и поэтому обладает большим числом степеней свободы, а значит и гораздо большим разнообразием возможных форм.

В основу статистики волн кладется спектр их высот, или, иначе, энергий, поскольку энергия волны пропорциональна квадрату ее высоты. Предложение определять спектры волн было сделано четверть века назад американским ученым У. Пирсоном. С тех пор выполнено много исследований учеными разных стран, в том числе и советскими учеными, среди которых в первую очередь следует назвать Ю. М. Крылова. На рис. 35 приведен спектр волн, то есть зависимость их энергии от частоты (или периода) в широком диапазоне скоростей ветра от 7 до 18 м/с и «длин разгона» до 150 км. Этот спектр был получен на основе измерений, сделанных в Баренцевом, Черном и Каспийском морях. Точки отвечают экспериментальным наблюдениям, сплошная кривая найдена по теоретической формуле и отражает наиболее вероятный спектр. Пунктирные линии соответствуют так называемому доверительному интервалу, в который должны попасть все точки с вероятностью 80%. По оси абсцисс отложена не сама частота ν , а ее отношение к $\bar{\nu}$ — средней частоте волн. По оси ординат также отложена не абсолютная, а относительная энергия по сравнению со средней энергией волн, пропорциональной квадрату их средней высоты \bar{h}^2 .

Из рассмотрения этой кривой можно вывести ряд закономерностей. Прежде всего видно, что энергия, сосредоточенная в волнах, быстро возрастает с ростом частоты, достигает максимума, после чего кривая сначала быстро спадает, а потом об-

разуется длинный пологий хвост. Интересно, что максимальная энергия приходится не на среднюю, а на наиболее вероятную частоту волн, которая на 20% меньше средней. (Для распределения скоростей молекул газа в некотором объеме получается очень похожая кривая, и для нее тоже наиболее вероятная скорость примерно на 20% меньше средней, точнее среднеквадратической. Разумеется, и здесь и там действуют совсем разные законы, но и в случайном есть общие закономерности!)

В чем ценность спектральных кривых распределения энергии волн? Они позволяют по средним характеристикам, вычисленным, скажем, энергетическим методом, определять вероятность, с которой могут появиться особенно высокие штормовые волны. Разумеется, реальная задача более сложна: приходится учитывать и наличие берегов, которые сокращают «длину разгона» волн, и перемены скорости и направления ветра. Но важность задачи стоит тех больших усилий, которые тратятся на ее решение.

Теперь вспомним об издревле рекомендуемом способе успокаивать морские волны — опускать в воду смоченные маслом пеньковые концы, плетеные маты или же вывешивать за борт парусиновый мешок, который наполнен ветошью, пропитанной тресковым жиром. Наблюдения показывают, что медленно стекающий в воду жир (скажем, чуть больше литра в час) способен даже больше. Не надо, однако, преувеличивать могущество этого способа. Тонкая жировая пленка, растекающаяся по воде, не в состоянии повлиять на гигантские штормовые волны в целом, но мелкие волны она успокаивает эффективно, гребни волн становятся более гладкими и приобретают большую устойчивость.

Существует множество разноречивых объяснений этого явления. Одни полагают, что тонкая жировая пленка имеет более высокий коэффициент поверхностного натяжения, чем вода (в больших объемах, наоборот, поверхностное натяжение воды вдвое больше, чем у жира), и потому не дает волнам заостряться, а затем разрушаться под действием ветра. Другие утверждают, что масло уменьшает трение между ветром и водой и тем самым затрудняет образование волн. (Между тем трение воздуха о воду столь незначительно, что вряд ли может вообще объяснить образование волн.)

Довольно убедительное объяснение действию жировой пленки на волны дал В. В. Шулейкин. Оно заключается в следующем. Масла и жиры — это так называемые поверхностно-активные вещества. Они понижают поверхностное натяжение воды и стремятся растечься по ее поверхности как можно шире, быстро образуя на воде очень тонкие пленки. Сложные по строению молекулы этих веществ имеют на концах активные группы атомов или ионов. Взаимодействуя с водой, молекулы выстраиваются частоколом на ее поверхности, поскольку группы на одном конце молекулы водой притягиваются, на другом — отталкива-

ются. Такой частокол может быть образован одним или несколькими слоями молекул. Вязкость, то есть внутреннее трение молекул, поверхностно-активных веществ больше вязкости воды и возрастает с увеличением их молекулярной массы.

Когда на поверхности воды оказывается слой (или слои) такого вещества, то при появлении волн они стремятся повторять коллективное движение частиц воды. Пленка, естественно, утоньшается на гребнях волн (помните: выпирание частиц воды из гребней в ложбины?) и утолщается во впадинах. Молекулы пленки все время совершают взаимные движения наподобие мехов гармошки, то сближаясь, то удаляясь друг от друга. Но в силу высокой вязкости масла эти движения сопровождаются намного большими затратами энергии, чем движения частиц воды в волне.

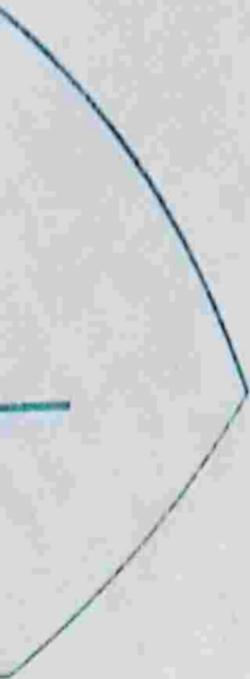
Вот эти-то движения и отбирают значительную часть энергии ветра, которая иначе пошла бы на образование сравнительно коротких волн. О гашении таких волн и идет речь: пленка быстро разрывается и уносится ветром, так что накрыть длинные волны она никак не может. Но именно короткие волны на склонах длинных часто чрезмерно заостряют и вызывают их разрушение. Пленки масла или жира не уменьшают волнения — они только делают волны более гладкими. А если волны вообще невысоки, то стоит только пройти моторному судну, и следом за ним потянется почти совсем гладкий шлейф: это выброс нефтепродуктов вовсе усмиряет мелкое волнение на воде.

Впрочем, появление гладких полос на поверхности моря может быть вызвано и так называемыми внутренними волнами. Но прежде чем рассказать об этом интереснейшем явлении (хотя и, строго говоря, непосредственно не видимом), закончим рассказ о ветровых волнах на заключительном этапе их существования.

Вот ветер стихает или волны вышли за пределы штормовой зоны. Что с ними происходит затем? Вынужденные волны стали свободными. Беспорядочная картина заостренных гребней, которые движутся по разным направлениям, сталкиваются друг с другом, обрушиваются в брызгах и пене, постепенно сменяется мирной картиной более регулярных волн, уже похожих на те, что рисуются в учебниках физики. Высота волн несколько уменьшается, гребни становятся более гладкими, и теперь волны движутся хотя все еще довольно высокой, но уже размеренной чередой. Это зыбь. Или мертвая зыбь, как ее издавна называют мореплаватели.

На море штиль, паруса бессильно обвисли, но внезапно откуда-то начинают накатываться высокие правильные валы. Душу томит неясное предчувствие, и действительно, спустя сутки-другие приходит жестокий шторм. Зыбь, если она не утихает через несколько часов, служит предвестником приближающегося шторма.

Но прежде появляются предвестники самой зыби — низкие



Трафур
III

времени прихода t^n волн с соответствующим периодом T . Наклон прямой линии к оси абсцисс равен L , а на пересечении прямой с осью абсцисс измеренный момент прихода волн равен моменту их зарождения t_0 . Таким образом, по наклону прямой и пересечению ее с осью абсцисс определяются расстояние до границы шторма и время выхода волн зыби из штормовой области.

Можно решать и другую, не менее важную и, конечно, гораздо более сложную задачу распространения зыби в океане, располагая статистическими данными о волнах в штормовой зоне. Для этого строят энергетический спектр волн в области шторма, подобный тому, что был показан на рис. 35, и из него определяют среднюю высоту штормовых волн и средний их период. По мере распространения волн их спектр должен изменяться. Во-первых, волны расходятся из зоны шторма как бы веером по различным направлениям, наподобие кругов от брошенного камня, а во-вторых, в результате дисперсии происходит перераспределение энергии волн по их частотам.

Пример такого расчета динамики волн зыби от шторма, удаленного на расстояние 3500 км от точки наблюдения, показан на рис. 37. Здесь на всех графиках изображен исходный спектр ветровых волн и зачернены участки, в которых сосредоточен спектр энергий зыби. По графику можно определить, что первыми спустя трое с половиной суток в точку наблюдения придут волны с наибольшей высотой 0,71 м и периодом 17 с. Затем примерно до 5,5 суток высота волн будет расти, достигнув около 1,5 м, а период самых высоких волн составит около 10 с. После этого зыбь медленно пойдет на убыль, но будет сохраняться еще в течение 8 суток, хотя под конец ее будет трудно уловить, поскольку она может быть замаскирована местным волнением.

Сказанное относится к наблюдениям волн зыби на глубокой воде, вдали от берегов. Когда зыбь приходит в мелководную прибрежную зону, все характеристики волн — высота, длина, период, наконец, направление распространения — будут радикальным образом изменяться. Описанию этих изменений мы посвятим отдельную главу.

А сейчас обратимся к описанию внутренних морских волн, о которых мы упомянули выше. Существование волн на границе между воздухом и водой — вовсе не уникальное явление. Волны могут возникать на границе раздела между двумя любыми средами с различающимися характеристиками. Так, волны могут возникнуть на поверхности раздела воды и масла и даже пресной и соленой воды, поскольку различны плотности обеих сред. Поверхностными эти волны, однако, уже неудобно называть, поскольку для поверхностных волн нельзя, поскольку название уже связано с акустическими волнами, в которых однородная среда испытывает совсем другое движение, а именно попеременное сжатие и расширение. Поэтому таким волнам присвоили название внутренних.

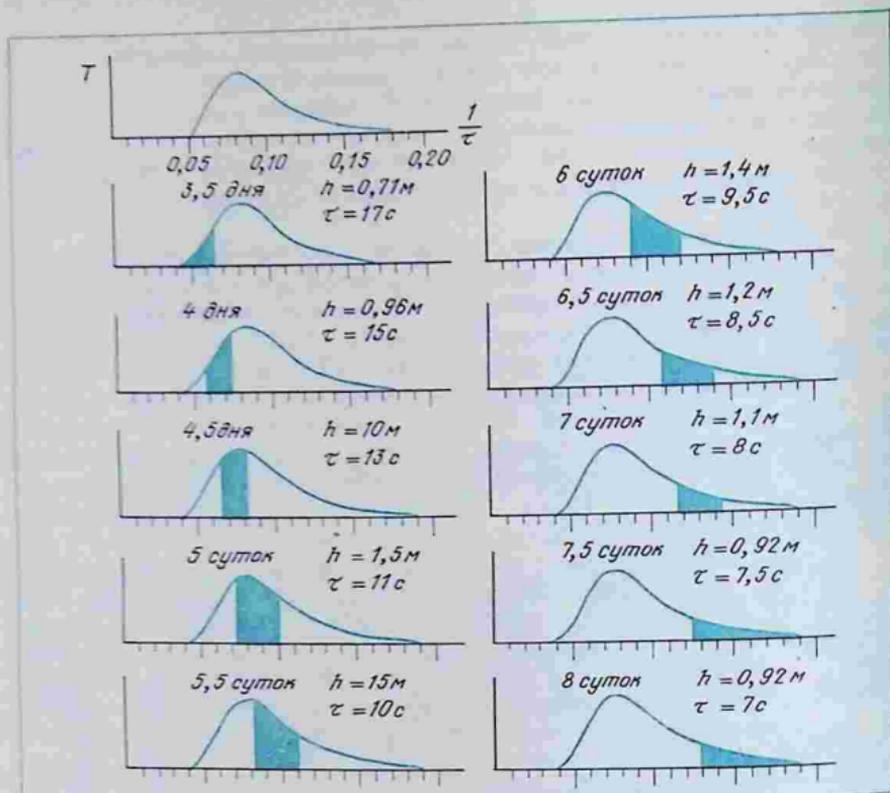


Рис. 37. Расчет динамики зыби по статистической теории ветровых волн

Впервые их, по-видимому, наблюдал еще в XVIII веке американский ученый Б. Франклин, экспериментируя с сосудом, в который поверх воды осторожно, чтобы не образовывалась эмульсия, было налито масло. В природе внутренние волны были открыты сначала в атмосфере (там они обуславливают, например, образование облачных барашков) и лишь затем в океане. Мысль о существовании внутренних океанских волн первым высказал известный полярный исследователь Ф. Нансен. Он сумел заинтересовать ею своих соотечественников, и первыми исследованиями внутренних морских волн мы обязаны скандинавским ученым. Ныне, в связи с началом освоения богатств океана и для обеспечения безопасного плавания судов под водой, исследования внутренних волн приобрели большой размах.

Разумеется, в воде таких резких границ между лежащими один над другим участками с разной плотностью, как между водой и воздухом, не бывает. Но нередко нет и равномерного, постепенного изменения плотности воды от ее поверхности к дну. Естественно, что вода вследствие гидростатического давления

имеет на глубине большую плотность, чем у поверхности. Но, кроме того, на плотность воды оказывают влияние ее температура и соленость. Диапазон изменения плотности воды в морях не очень велик — примерно от $0,996 \text{ г/см}^3$ при температуре 30°C и нулевой солености до $1,032 \text{ г/см}^3$ в самом глубоком месте Мирового океана — Марианской впадине, где у дна на глубине около 11 км царит температура -2°C , а соленость равна 40% .

Но и в этом небольшом диапазоне существуют скачки плотности. Например, на Каспии на глубине от 17 до 18,5 м перепад температур может достигать 13° . В Черном море летом вода у поверхности прогрета до $24-25^\circ\text{C}$, а уже на глубине около 20 м температура падает до $8-10^\circ\text{C}$. В Средиземном море на небольшой глубине обнаруживаются скачки температур, разделенные слоями воды лишь в десяток сантиметров. В таких скачках плотность резко меняется на расстояниях в десятки сантиметров. Конечно, это очень резкое изменение по сравнению с медленным нарастанием плотности на расстояниях в сотни метров или несколько километров от поверхности до дна.

А то, что даже наибольшее изменение плотности в скачке невелико, определяет очень большую высоту внутренних волн. В самом деле, пусть слой воды меньшей плотности ρ_1 лежит на слое с большей плотностью ρ_2 . Тогда избыточный вес единицы его объема будет равен $mg(\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$. Если работа, которую нужно затратить на образование поверхностной волны высотой $h_{\text{пов}}$, равна $mgh_{\text{пов}}$, то та же работа создаст внутреннюю волну, высота которой равна

$$h_{\text{вн}} = \frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} h_{\text{пов}} = \frac{\rho}{\Delta\rho} h_{\text{пов}}. \quad (14)$$

Если плотности двух слоев различаются, скажем, на $0,01 \text{ г/см}^3$, что совсем нередкий случай, то внутренняя волна окажется в 100 раз выше поверхностной.

Все характеристики поверхностных волн можно перенести и на внутренние волны, только немного изменяются формулы, которые описывают их связь. Так, например, если для поверхностных волн частота их на глубокой воде дается формулой

$$\gamma_{\text{пов}} = \frac{c_{\text{ф}}}{\lambda} = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}}. \quad (15)$$

то для внутренних волн частота (она называется частотой Вейселя, по имени ученого, предложившего эту формулу)

$$\gamma_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta z}}, \quad (16)$$

где $\Delta\rho$ — прирост плотности, соответствующий приросту глубины Δz . Обычно нарастание плотности воды идет довольно медленно, но все же не по линейному закону. Поэтому частота, или период, внутренних волн несколько зависит от глубины z . На участках, где наблюдаются скачки плотности, величина

$\Delta\rho/\Delta z$ резко возрастает, и на зависимости $v_{\text{вн}}$ от z появляются отчетливые максимумы. Период волн, соответствующий этим максимумам, лежит в диапазоне от 1 до 10 мин, тогда как там, где перепады плотности невелики, он может доходить до 3—4 ч и даже более.

Для определения фазовой скорости $c_{\phi}^{\text{вн}}$ длинных внутренних волн обычно предполагают, что слой воды толщиной h_1 и плотностью ρ_1 лежит на слое толщиной h_2 и плотностью ρ_2 , причем сумма $h_1 + h_2$ равна глубине водоема. Конечно, это идеализация, поскольку резкой границы между двумя слоями воды быть не может, вода на границе хоть немного, но обязательно перемешивается. Но все же считают, что толщина слоя перемешивания мала по сравнению с h_1 и h_2 . Тогда получается

$$c_{\phi}^{\text{вн}} = \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} / \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right)}. \quad (17)$$

Если толщина слоя h_1 много меньше, чем толщина h_2 , то получается формула

$$c_{\phi}^{\text{вн}} = \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} h_1}. \quad (18)$$

очень похожая на выражение для c_{ϕ} на мелкой воде (4), с той лишь разницей, что дном оказывается граница слоев, а слой менее плотной воды существенно облегчен, как тело пловца в воде. Поэтому фазовая скорость внутренних волн в десятки раз меньше скорости поверхностных волн с такими же длинами.

Внутренние волны в морях имеют в общем такое же происхождение, как и поверхностные волны. Они тоже бывают бегущими и стоячими, вынужденными и свободными, возникают под действием приливообразующих сил (Луна и Солнце вздымают весь объем водных бассейнов!), перепадов атмосферного давления, ветра и воздействия самых поверхностных волн.

Однако движение частиц воды во внутренних волнах сложнее, чем в поверхностных. Если сила, действующая на частицу, выводит ее из положения равновесия, в котором она находилась в соответствии со своей плотностью, например вверх, то частица попадает в область с пониженной плотностью. Когда скорость ее вертикального перемещения обратится в нуль, частица начнет погружаться и по инерции проскочит положение равновесия. Попад затем в слой с более высокой плотностью, частица под действием архимедовой силы начнет подниматься вверх. Такие колебания будут продолжаться, пока не затухнут из-за внутреннего трения, если, конечно, их не поддерживает энергия из внешнего источника.

В появляющейся бегущей волне (рис. 38), если она движется влево, частицы на гребне вращаются против хода волны, по часовой стрелке, а во впадине — вдоль хода волны, против часовой стрелки. Поэтому в среде, лежащей ниже границы раздела, частицы над гребнем будут сближаться, а в вышележащей среде —

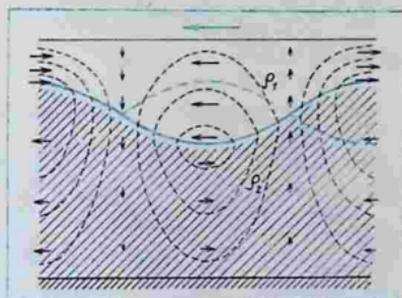


Рис. 38. Движение частиц в бегущей внутренней волне

соответственно расходиться. Во впадине будет иметь место обратное явление. Траектории частиц имеют сходство с орбитами, которые частицы описывают в поверхностных волнах, и тоже, строго говоря, представляют собой незамкнутые кривые.

Мы не будем подробно останавливаться на отдельных видах внутренних волн. Ветровые внутренние волны в последние годы интенсивно изучаются в лабораториях, где для их наблюдения можно использовать штормовые бассейны, а вместо воды брать слои воды и, скажем, керосина. При этом удается наблюдать интересные явления резонанса внутренних волн друг с другом и с поверхностными волнами.

Например, если есть две поверхностные волны с длинами λ_1 , λ_2 и частотами ν_1 и ν_2 и найдется подходящая внутренняя волна с такими длиной $\lambda_{\text{вн}}$ и частотой $\nu_{\text{вн}}$, что $\frac{1}{\lambda_1} \pm \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_{\text{вн}}}$ и $\nu_1 + \nu_2 = \nu_{\text{вн}}$, то начнется интенсивная перекачка энергии поверхностных волн в эту внутреннюю волну и высота ее сильно возрастает. В штормящем море, где можно найти какие угодно волны, такая перекачка энергии может идти в широких масштабах. И под водой может возникать отражение того, что творится на поверхности моря, — длинные внутренние волны, гребни и впадины которых будут испещрены сеткой коротких волн. Возникнут и турбулентные вихри, которые будут разрушать наиболее неустойчивые внутренние волны, только разве что с гребней не будут срываться пенные шапки. Ведь пена — это захваченные водой пузырьки воздуха, результат перемешивания воздуха и воды. Такое же перемешивание слоев разной плотности происходит и при разрушении внутренних волн, скачки плотности размываются, а с ними и ослабевают волны.

На мелководье внутренние волны, как и поверхностные, могут преломляться, испытывать дифракцию (например, у волноломов) и даже, вырастая по высоте, создавать подводный прибой. Могут они принимать участие также в создании гладких полос в море, часто видных, например, у побережья (рис. 39).

Впервые на существование гладких полос обратил внимание В. В. Шулейкин еще в 1938 году, а затем их исследование в различных морях продолжили другие океанологи. На поверхности



Рис. 39. Гладкие полосы на поверхности моря

воды всегда существует пленка поверхностно-активных веществ частью природного, а частью искусственного происхождения. (Увы, эта последняя часть в последние годы стремительно растет, загрязнение моря приняло угрожающие размеры.) В природных условиях такая пленка неэффективна для гашения морского волнения. Но когда возникает подводная волна, в тех местах, где располагаются ее впадины, частицы поверхностного слоя движутся вниз, сближаются и увлекают за собой молекулы поверхностно-активного вещества. Сближение молекул ведет к утолщению пленки, которая стягивается к впадинам волны и оголяет участки моря над гребнями внутренней волны. Утолщенные участки пленки, однако, уже способны гасить мелкую рябь, возникающую при скорости ветра примерно до 4 м/с. Над впадинами внутренних волн образуются хорошо видимые гладкие полосы, окруженные областями ряби.

Эти полосы могут образовывать приблизительно параллельные ряды и перемещаться вместе с медленно движущейся внутренней волной. Если же волна не бегущая, а стоячая, то гладкие полосы будут попеременно появляться и исчезать в соответствии с периодом колебаний частиц в пучностях, то есть когда в пучности частицы движутся от поверхности в глубину.

С внутренними волнами, когда скачок плотности воды находится на небольшой глубине, связано еще одно очень интересное явление — так называемая мертвая вода. В такой воде застревают корабли, не в силах сдвинуться с места даже при работе судовых двигателей на полную мощность. Но это явление уместнее рассмотреть в главе, посвященной волнам, создаваемым кораблями.

Чтобы закончить разговор о внутренних волнах, вкратце рассмотрим возникновение их в атмосфере. В воздухе, как и в морской воде, нередко могут встретиться скачки плотности, налагающиеся на регулярную зависимость плотности воздуха от высоты подъема. Для этого достаточно уже небольшого перепада температуры в соседних слоях воздуха. И тогда на границе раздела слоев в результате горизонтального движения воздуха или иных причин могут возникать внутренние волны.

Перепад температур в соседних слоях может создавать условия, при которых находящиеся в воздухе пары воды начнут конденсироваться в облака, — они и сделают видимым существование внутренних волн в виде известных всем регулярных рядов барашков.

Иногда внутренние волны в таких зонах скачка плотности могут вызываться пролетающими самолетами. Если самолет летит на достаточно большой высоте, так что за ним образуется видимый след, то нередко след имеет поперечно-полосатую структуру. Эта структура и есть проявление внутренних волн на границе раздела слоев воздуха с разной плотностью.

ВОЛНЫ И БЕРЕГА

Смотрю на волны; их неверных линий
Не угадав, смущен их вечной сменой...
Приходят волны к нам из дали синей,
Взлетают в брызгах, умирают пеной.

В. Брюсов

Путешествуя вместе с ветровыми волнами, вышедшими из зоны шторма, мы наблюдали, как исчезали острые гребни волн и волны постепенно становились все более регулярными и полными. Но вот мы замечаем, что волны снова начали расти в высоту, а их длина стала уменьшаться. Это — верный признак того, что волны выходят на мелководье. Отмели, или банки, могут встречаться и далеко в море. Но нас больше будет интересовать поведение волн на прибрежном мелководье, где они вступают в заключительную стадию своего существования.

При этом могут быть две возможности. Или волна разобьется неподалеку от кромки берега, а то и на самом берегу. Или она войдет в реку, которая впадает в море. И в том и в другом случае форма волны изменяется до неузнаваемости.

Волна, проделавшая долгий путь к берегам и вошедшая в реку, продлевает свою жизнь. Мы уже знаем, что движущаяся по реке волна, пришедшая из моря, называется бором.

Наиболее регулярен и отчетливо выражен бор, вызванный приливной волной. Когда она входит в русло реки с меньшей глубиной, чем прилегающий к ней участок моря, и к тому же стесненное берегами, ее высота, естественно, повышается. Формулу для такого повышения мы приводили в конце второй главы.

В результате по реке вверх начинает двигаться довольно высокий вал или реже группа валов, которая называется периодическим бором. Фотографии боров приведены на рис. 40 и 41.

Высота бора, конечно, зависит от высоты приливной волны и других местных условий. Обычно она невелика. Большим бором считается движущийся вал высотой приблизительно 2 м, но встречаются и боры, достигающие высоты 6 м (на реке Фучуньцзян в Китае). Характерный признак бора — кипящая стена воды на его фронте; движение бора поэтому сопровождается сильным гулом.

Бор чаще встречается на таких реках, ложе которых довольно круто опускается в море. Водяная стена иногда отчетливее выражена на середине реки, а иногда у берегов. Это зависит от профиля дна реки. Бор нередко движется с солидной скоростью, превышающей 20 км/ч. Небольшие суда, отстоявшись в бухте при прохождении бора, затем седлают волну и движутся вверх по реке, не тратя усилий на преодоление встречного течения.



Рис. 40. Бор на реке Фучуньцзян



Рис. 41. Бор на реке Сене

В явлении бора мы впервые встречаемся с типом волн, о которых до сих пор не говорили. Это — ударные волны, широко распространенные в природе. Они возникают, если скорость движения тела превышает фазовую скорость распространения волн. Таким телом может быть и корабль, и просто пластинка, которую мы погрузили в воду и резко сдвинули с места. Ударную волну вызывает и резкое закрытие водопроводного крана, и сброс воды через плотину, и движущийся по горной реке грязевой поток — сель, и движение снега в снежной лавине. Ударные волны — только уже не поверхностные, а звуковые — создает и шелканье пастушеского кнута, и полет снаряда или самолета со скоростью больше скорости звука в воздухе. Все эти волны имеют еще одно общее свойство: они нелинейны, и на их фронте возникает скачок некоторых величин, например скорости движения среды.

Приливная волна, будучи волной на мелководье, причем волной чрезвычайно пологой, движется со скоростью, которую можно найти по формуле (4):

$$c_{\phi} = \sqrt{g(D+h)}, \quad (19)$$

где h — высота волны, а D — глубина водоема. На совсем мелкой воде около устья реки величина h становится сравнимой с величиной D . В свою очередь, фазовая скорость распространения волн в самой реке до подхода бора равна $c_{\phi} = \sqrt{gD}$, где D — глубина русла реки. Отсюда видно, что c_{ϕ} больше c_{ϕ} , то есть волна из моря движется с так называемой сверхкритической скоростью.

Это означает, что вода, находящаяся перед стеной бора, не успевает подготовиться к его приходу, и бор образует в ней участок сжатия, который бежит по реке перед фронтом бора. Однако скорость движения бора в реке выражается не формулой (19), а более сложной. Если обозначить глубину воды в боре через D_1 и перед ним через D_0 , то его скорость v будет равна:

$$v = \sqrt{g \frac{D_1(D_1 + D_0)}{2D_0}}. \quad (20)$$

Поскольку D_1 больше D_0 , то отсюда видно, что v больше, чем $c_{\phi} = \sqrt{gD_0}$.

А что происходит позади бора? Там частицы воды движутся с другой скоростью

$$v' = \sqrt{g \frac{D_0(D_1 + D_0)}{2D_1}}, \quad (21)$$

то есть со скоростью меньшей, чем фазовая скорость за бором $c_{\phi} = \sqrt{gD_1}$. Это означает, что любые волны, возникшие позади бора, будут догонять его фронт и в конце концов сольются с ним. Вот почему позади бора, как и впереди него, нет никаких волн, а движется лишь водяная стена.

Поскольку бор — нелинейная волна, в нем движется не толь-

ко форма, но и частицы. Интересно, что скорости движения частиц по обе стороны фронта бора различны: на самом фронте происходит скачок не только плотности, но и скорости частиц воды. Это означает, что происходит скачок и энергии частиц, и можно подумать, что на фронте бора не выполняется закон сохранения энергии!

Но это только на первый взгляд. Ведь механическая энергия движущихся с волнами частиц — не единственный вид энергии. Потерянная частицами, скатывающимися с фронта бора в неподвижную воду, энергия превращается в тепло. Механизмом такого превращения служит образование вихрей при турбулентном движении жидкости. Вот почему вода на переднем фронте бора кипит, конечно, не в буквальном смысле, а лучше сказать бурлит. (Кстати, когда самолет летит со сверхзвуковой скоростью, то на фронте ударной волны воздух нагревается до такой температуры, что начинает светиться; а отброшенные ступени космических ракет и метеориты вообще сгорают от тепла, выделяемого на фронте образующей ими ударной волны.)

Глубина реки никогда не бывает одинаковой по ее сечению. У берегов она меньше, поэтому, казалось бы, бор, двигаясь по реке, должен изогнуться дугой. Ничего подобного, однако, не наблюдается: бор идет ровным фронтом. Очевидно, чтобы это могло быть, у берегов высота бора должна быть выше, причем настолько, чтобы выравнивалась скорость фронта по всему течению. Так оно и есть в действительности.

Нужно только внести одну поправку. Бор движется все-таки не по неподвижной воде, а по реке, где есть течение, которое всегда будет противоположным движению бора. Известно, что скорость течения обычно наибольшая на середине реки и наименьшая у берегов (в этом повинно трение воды о берега). Поэтому течение реки должно наиболее сильно замедлять движение бора посередине реки и слабее всего у берегов. Разница в высотах бора на середине реки и у берегов, необходимая для поддержания сплошного фронта бора, оказывается не столь большой.

На медленно текущих и вместе с тем глубоких реках может получиться и так, что бор на середине реки будет почти незаметен, зато у берегов покатится высоким валом. Так, например, происходит на Сене в ее нижнем течении между Руаном и морем (там бор называется «маскар»). Вал здесь столь высок, что обрушивается даже на высокую набережную и порой смывает неосторожных зрителей этого впечатляющего явления.

Может ли существовать бор при отливе? В некоторых книгах встречается утверждение, что отлив происходит значительно медленнее прилива, а глубина реки в начале отлива существенно выше, чем в начале прилива. Поэтому бор при отливе не образуется, и понижение уровня реки происходит постепенно.

Бор при отливе действительно не возникает, но совсем по другой причине. Волна понижения — идущая вперед впадина, а не горб волны, — обладает тем замечательным свойством, что

на ней не нарастает крутизна ее фронта, а потому и не возникает скачка.

А теперь рассмотрим гибель волны на морском берегу. Она представляет собой не менее красивое зрелище, чем прохождение бора. Когда к берегу подходят крупные волны, часто можно заметить толпы людей, способных часами смотреть на эту никуда не надоедающую картину прибоев и бурунов.

Прежде всего обратим внимание на то, что крупные волны зыби, пришедшей далеко из моря, движутся ровными рядами почти параллельно линии берега. Это — результат рефракции, о которой мы рассказывали в первой главе. Участок фронта волны зыби, первым выступающий на мелководье, начинает двигаться с меньшей скоростью $c = \sqrt{gD}$, где D — глубина дна. Его нагоняют еще незамедлившиеся участки фронта, и фронт поворачивается параллельно границе раздела.

Резкой границы раздела между глубокой и мелкой водой в море почти нет, глубина моря уменьшается обычно постепенно. Волновой фронт также поворачивает постепенно и выстраивается вдоль линий равных глубин (изобат), которые у берега нередко почти параллельны береговой линии. При рефракции постепенно уменьшается и длина волн. В этом можно было убедиться в опытах с преломлением волн в сосуде, которые мы уже описывали, или непосредственно из формулы (1). Поскольку частота волн должна оставаться неизменной, длина волн на мелкой воде уменьшается столь же быстро, сколь скорость волны.

В результате уменьшения длины волны увеличивается ее крутизна. Когда глубина моря приближается к значению, примерно вдвое превышающему высоту волны, гребень волны начинает заостряться. Волна еще не потеряла своей устойчивости, но уже близка к этому. На глубине около 1,3 высоты гребня устойчивость волны, достигшей предельной крутизны склонов 120° , полностью исчезает. Волна опрокидывается, и еще довольно далеко от берега возникает бурун.

Можно сказать так, что когда волна выходит на глубину, сравнимую с ее высотой, ей уже не хватает воды для того, чтобы наполнить гребень. Волна теряет симметричную форму и разрушается, поскольку вершина гребня утрачивает поддержку и опрокидывается. Можно сказать и иначе: волна «чувствует» дно. Частицы под гребнем вблизи дна замедляют свое движение, тогда как частицы на вершине гребня не успевают этого «почувствовать» и продолжают двигаться по своим орбитам с прежней скоростью.

Образно говоря, волна испытывает то же, что и пассажир, стоящий в вагоне резко тормозящего трамвая: ступни его тормозятся быстрее, чем голова, и сила инерции опрокидывает пассажира вперед. Аналогично опрокидывается и гребень волны. Картина изменения профиля волны при ее опрокидывании, однако, настолько сложна, что до сих пор не удалось дать ей точного математического описания. Опрокидывание и разрушение



Рис. 42. Буруны у морского берега

волны — это, в сущности, проявление предельной нелинейности волн.

Опрокидываясь, гребень захватывает воздух, а разбиваясь, превращается в бурлящую массу пены, которая по инерции несется к берегу. Но если бурун образовался на подводном валу, по другую сторону которого глубина снова увеличивается, то волна, подобно птице Феникс, возрождающейся из пепла, может снова восстановить свою форму!

Подводный вал действует как естественный волнолом, за ним вода более спокойна, и переданный ей импульс от разрушившейся волны может породить новую волну. Но часть энергии первоначальной волны, конечно, пропала безвозвратно — ушла на очень сильное турбулентное движение, на взброс брызг и, кроме того, буквально ушла в морское дно. Вновь образовавшаяся волна уже ниже первоначальной. Она перемещается к берегу, пока не достигнет, в свою очередь, критической глубины, равной $1,3$ ее высоты, теперь разбивается и она. В зависимости от профиля дна у берега может возникнуть несколько бурных полос (рис. 42).

Но вот у последней полосы бурунов глубины воды уже не хватает для образования еще одной волны, и волна превращается в вал, который выбрасывается на пляж бурлящим слоем, доходит до верхней границы заплеска и там исчезает. Вся энергия волны, так медленно накапливавшаяся в области шторма, столь мало растроченная при движении волны к берегу, теперь расходуется в течение нескольких секунд. И мощность прибоя сказывается намного выше мощности волн в штормовой зоне,

потому-то прибойные волны могут причинять кораблям у берега или портовым сооружениям огромные разрушения.

Такая картина прибоя образуется на отмелях берегах, когда дно идет под углом около 1° или меньше. Если у берега нет отмелей или подводный склон у него достаточно крут, наблюдаются другие формы прибоя. Они называются ныряющими и скользящими бурунами.

Ныряющий бурун представляет собой столкновение волны с подводным препятствием. Море перед таким препятствием глубокое, так что волна еще не уменьшила своей энергии и движется с большой скоростью. Когда перед гребнем вырастает подводное препятствие, то навстречу ему движутся частицы от предыдущей волны, частично уже отраженной от препятствия.

Что произойдет при этом, можно так же, как и выше, описать двумя способами. Согласно первому возвратной воды недостает, чтобы заполнить провал перед гребнем. Согласно второму движение частиц в возвратной волне направлено навстречу движению частиц у основания гребня, и он здесь испытывает особенно резкое торможение. Повторяя аналогию с пассажиром трамвая, можно сказать, что в момент торможения вагона еще ко всему дернулся назад пол, на котором стоит пассажир. Конечно, при этом сила торможения еще более возрастет, и гребень волны опрокинется еще стремительнее. Столкнувшись с препятствием, волна выбрасывает вверх фонтаны воды. Это — очень впечатляющее зрелище (рис. 43).

Проектирование сооружений, способных не только предохранить постройки на берегу или стоящие в гавани корабли от разрушительного действия волн, но и выстоять в течение долгого времени под их ударами, составляет целую инженерную науку. И даже, можно сказать, инженерное искусство, где многое зависит от интуиции и опыта проектировщиков. Рассчитать, как распределяется энергия и импульс волны при ее разрушении, да еще учесть статистику и высоты волн и направлений их движения и рельеф дна у берега, — задача, пока еще непосильная для теории.

Конечно, такое проектирование основывается на ряде общих оценок. В них принимаются во внимание и предельно высокие зарегистрированные волны в районах, где предполагают строить волнозащитные сооружения, и многолетние тенденции изменения рельефа дна возле берега, вызываемого волнами, и целый ряд других факторов.

Нас в большей степени интересует здесь физика явлений, происходящих при набегании волн на препятствия. Всегда стремятся к тому, чтобы энергию разрушающейся волны направить на воду же. Турбулентное движение частиц воды должно в значительной степени отобрать на себя энергию волн. В сущности, именно этой цели служат волноломы.

Как следует из их названия, они ломают волну, заставляют

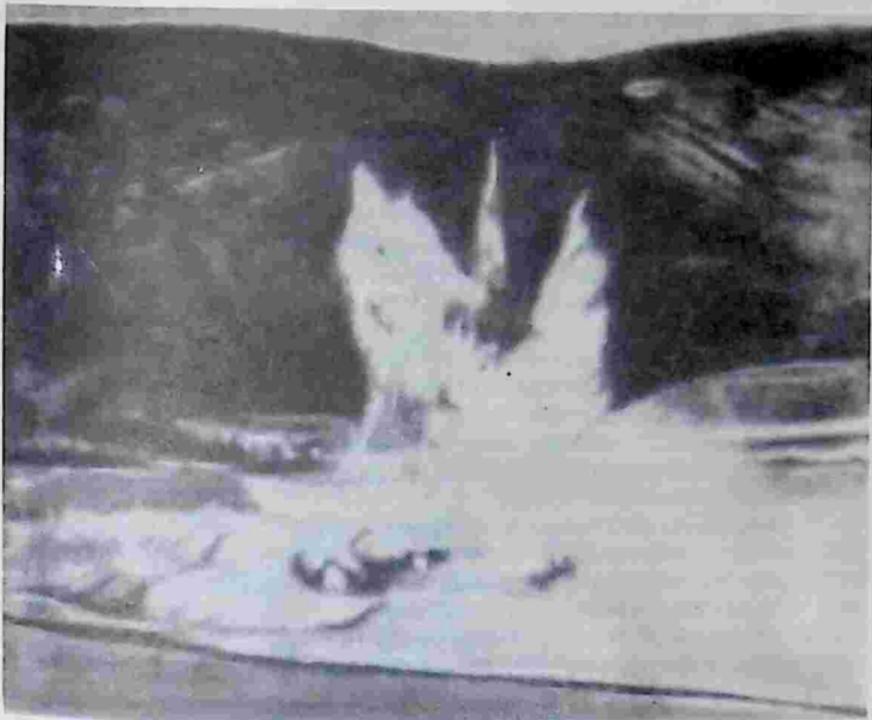


Рис. 43. Фонтаны, выбрасываемые волной, разбивающейся на мелководье

ее обрушиваться. В самом простом случае волнолом представляет собой просто подводную ступеньку, резкое повышение дна моря. Как уже говорилось, наблюдения показывают, что волна разрушается, когда глубина моря в данном месте достигает примерно 1,3 высоты волны. Такую ступеньку не обязательно делать строго вертикальной, ей можно придать и наклон. Более того, волнолом можно сделать вообще плавающим, если дно находится на довольно большой глубине и строительство сплошной стены может обойтись чрезмерно дорого.

Действие его основано на том, что он имеет достаточно большую инерцию и поэтому прекращает движение волны. Частицы волны, нависающей над волноломом, продолжают двигаться, тогда как частицы в подошве гребня останавливаются. Вспоминная, как мы описывали разрушение волны, можно в этом случае сказать, что не хватает воды для восполнения формы гребня и он обрушивается.

Ясно, что такой волнолом должен иметь достаточную протяженность по ходу волны. Если он будет слишком узким, то волна может и не заметить его. Особенно эффективным плавающим волноломом может оказаться, когда его длина совпадает или близ-

ка к длине набегающей на него волны. Но, конечно, подобрать волнолом, одинаково эффективно разрушающий волны самых различных длин, невозможно. За меру его эффективности принимают отношение высот падающих на него и отраженных им волн. При удачной конструкции волнолома можно достичь того, что он будет более чем на 90% гасить энергию набегающих на него волн.

Столь же эффективны многие волноломы, установленные на берегу или в непосредственной близости от него. Обычно переднюю стену волнолома выполняют из рваного камня, блоки которого имеют весьма неправильную форму. Его задача — создать как можно более турбулентное течение в воде. Вместе с тем он должен оказывать достаточное сопротивление разрушающему действию волн. Такая крупнопористая конструкция рассредоточивает пик давления при ударе волны. Ослабляется и эффект гидростатической потери веса волнолома в воде, в результате которого волна могла бы перемещать облегченные элементы конструкции волнолома.

Волноотбойные стенки служат для того, чтобы в значительной степени отражать энергию волн обратно в море. Обычно они представляют собой каменное или железобетонное сооружение с гладкой передней поверхностью, имеющей вогнутое сечение и нависающую над водой верхнюю часть. Внизу стены ее профиль сделан ступенчатым, чтобы удлинить время удара волны и тем самым рассредоточить пик давления. Если волна подходит к стенке по глубокой воде, то она обычно отражается, не разбиваясь. Если волна перед подходом к стенке разбивается на берегу, то возникающий поток взлетает по стенке кверху, опрокидывается наверху ее и падает обратно на берег. Кинетическая энергия потока на стенке превращается в потенциальную энергию его подъема, и стенке передается сравнительно небольшая энергия. Возникающие обратные волны или течения от стенки гасят или по крайней мере ослабляют силу ударов подходящих к берегу волн.

Для еще большего рассредоточения момента наивысшего давления волноотбойные стенки и волноломы устанавливают так, чтобы их длинные стороны составляли некоторый небольшой угол с преобладающим в данных условиях фронтом волн. Разумеется, для определения угла надо располагать статистикой направлений, по которым к берегу приходят волны, знать картину распределения глубин у берега и учитывать рефракцию волн на мелководье.

Мы не будем вдаваться в детали того, каким именно образом волна разрушает препятствия на своем пути. Скажем лишь, что начальная фаза разрушения подготавливается захваченным и сжатым волной воздухом, который, попав в преграду, расширяется и тем самым расшатывает ее. Удары волн лишь довершают разрушение, разрывая вовсе связи в преграде и перемещая отдельные ее элементы. Нередко можно наблюдать, как вол-

на играючи передвигает тысячетонные блоки волноломов.

Но вернемся к прибою на отлогом (как говорят ученые и моряки, отмелом) берегу. Мы уже рассказывали о резко обрушивающихся волнах — ныряющих бурунах, представляющих собой достаточно грозное явление. На отмелых берегах часто возникает другая разновидность прибоя — скользящие буруны. В отличие от ныряющего буруна скользящий бурун разбивается медленно и до полного разрушения успевает пройти значительное расстояние. Вершина скользящего буруна словно сползает вдоль профиля волны, и это может длиться несколько минут. Разумеется, в такой волне устойчивость уже потеряна, у гребня появляется пенная шапка, и частицы воды, двигаясь по разорванным орбитам, совершают поступательное движение.

Скользящие буруны этим своим свойством способствовали возникновению увлекательного и красивого спорта — катания на доске, сёрфинга (от английского слова surf, означающего прибой или буруны). Очень популярны для сёрфинга некоторые участки побережья Гавайских островов и Австралии, где от пляжей в море на несколько километров тянутся коралловые рифы. Высокие волны зыби от тихоокеанских штормов, приходящие к таким участкам побережья, превращаются в скользящие буруны.

При катании на буруне на спортсмена, как и на любое тело в воде, действуют сила тяжести и архимедова сила. Последняя направлена по перпендикуляру к поверхности воды, так что если спортсмен оказывается на переднем склоне волны, возникает равнодействующая скатывающая сила. Когда эта сила сравняется с силой лобового сопротивления воды, спортсмен начинает перемещаться со скоростью гребня.

Вовсе не обязательно, чтобы спортсмен двигался в точности со скоростью гребня. Если удачно выбрать момент начала катания, когда волна только-только подкатывается под доску, и сориентировать доску под определенным углом к воде, можно даже двигаться со скоростью, превышающей скорость гребня, поскольку скатывающая сила будет превышать лобовое сопротивление воды.

В сущности, такой же сёрфинг, только не над поверхностью воды, а под водой, совершают дельфины, подолгу сопровождая суда. Условия для подводного сёрфинга создает носовая волна (о ней будет подробный разговор в следующей главе), которая возникает при движении судна, она охватывает и некоторый слой под водой возле поверхности. Дельфины занимают положение на пологом переднем склоне одной из таких волн и движутся вместе с ним. Это позволяет им двигаться, почти не расходуя сил. Встречное сопротивление воды вследствие строения кожи дельфина оказывается очень малым, и, в сущности, дельфин при сёрфинге расходует энергию только на его преодоление.

Понаблюдаем за прибоем у самого берега. После того как пенный поток от разбивания волны у кромки берега достиг наивысшей точки уже на берегу, он начинает откатываться об-

ратно в море. Это противотечение способно ускорить развитие неустойчивости в приходящих волнах, дополнительно тормозя частицы в подошве гребня, о чем мы уже говорили. Казалось бы, противотечение должно заканчиваться у подошвы ближайшего к берегу гребня. Оно тормозит направленное к берегу движение воды, но и само тормозится им. Поэтому вода вроде бы должна совершать колебательное движение между границей разбивания волн и границей их заплеска на берег. Между тем положение оказывается не столь простым. Возле дна существует так называемое донное противотечение, порой довольно сильное и представляющее определенную опасность для пловцов.

Когда пловец находится за пределами области, где разбиваются волны, он совершает примерно такое же движение, как и частицы воды в волне. Его тело приблизительно описывает окружности, причем с каждым оборотом он совершает небольшое поступательное движение и медленно приближается к берегу. Когда пловец оказался на гребне разрушающейся волны, его вместе с пенным потоком швыряет к берегу.

Если он встанет на ноги, то дальнейшее зависит от того, сможет ли он удержаться на ногах. Если место, где обрушилась волна, достаточно глубокое, то пловец, даже встав на ноги, может быть сбит следующим буруном или еще раньше обратным течением, в котором частицы перед встречей гребня движутся вверх. На мелком месте пловец, встав на ноги, уже не в такой степени является игрушкой волн.

Но если пловец попадает на такой участок, где существует сильное донное противотечение, то его может снести на некоторое расстояние в море. Возникновению противотечения в известной степени способствуют сами разбивающиеся волны. В момент удара о дно или о поверхность невысокой воды энергия разрушенной волны отчасти передается песку или мелким камням и перемещает их вперед. Следующая волна, разбиваясь на более мелком месте, подгонит к нему песок, в результате в воде образуется невысокий подводный вал. Если приглядеться, он не сплошной, в нем словно прорыты узкие каналы. По ним и оттекает часть воды обратно в море, причем течение ее получается не сплошным, а разрывным.

Каналы, как правило, наблюдаются лишь на приглубых берегах. На отмельках берегах излишки воды, выброшенные волной, в основном растекаются вдоль берега, а не сразу бегут обратно в море. Течение в канале оказывается борообразным, потому что здесь глубже, чем у подводного вала по обе стороны от канала, и скорость течения в канале выше, чем над валом. По этому признаку каналы можно и обнаруживать — фронт волны, сплошной позади вала, разрывается на валу: волны разбиваются над валом, но не над каналом.

Но это обстоятельство может и отпугнуть пловца: он предпочтет выбираться на берег не там, где разбиваются волны и взлетают фонтаны брызг, а на более спокойном, но предатель-

ском месте. Во всяком случае пловцу не следует теряться, если его относит в море: нужно просто немного отплыть в сторону от этого места и подобрать подходящий бурун, который в конце концов вынесет пловца на берег. Можно дать и еще более надежный совет: не входить в море в сильный прибой, когда течения от разбивающихся волн образуют весьма простую и очень измечивую картину.

Одна из сложных задач — защита морских берегов от размывания. Кроме того, приходится защищать акватории морских портов от обмеления вследствие того, что волны и течения наносят к ним песок и камни, так называемый пляжевый материал. Вопрос о переходе энергии морских волн в энергию перемещения частиц пляжевого материала чрезвычайно труден и до сих пор далеко не полно разработан.

Сложность процесса связана с тем, что в нем одновременно участвует целый ряд явлений. Прежде всего, это чисто гидродинамическое давление движущейся с большой скоростью воды. Разбивающиеся волны вместе с тем захватывают и сжимают воздух, который, расширяясь на берегу, может откалывать крупные куски породы, слагающей участки за пляжем на суше, — так называемый клиф. Волны могут нести с собой обломки скал, и тогда их воздействие на берег будет еще более разрушительным. Сами обломки, сталкиваясь друг с другом, истираются, поэтому на пляже часто можно встретить хорошо окатанную гальку. Наконец, попеременно затопляемые и осушающиеся участки пляжа могут подвергаться своеобразной коррозии: морская вода растворяет карбонаты и некоторые силикаты. От действия всех этих факторов в течение длительного времени береговые скалы постепенно превращаются в мелкий песок.

Лишняя вода от разбивающихся волн на отмелях берегах, как правило, сначала движется вдоль берега, лишь постепенно скатываясь в море. Кроме того, часто волны подходят к берегу не параллельно, а под некоторым углом к нему. Частицы песка имеют довольно малые размеры и, легко поднимаясь с пляжа или со дна возле берега, оседают с небольшой скоростью. Поэтому течения воды вдоль берега могут переносить песок и мелкую гальку порой на значительные расстояния.

Знакомые всем буны, устанавливаемые через определенные интервалы на берегу перпендикулярно береговой линии, в сущности, предназначены для задержки движения пляжевого материала вдоль защищаемого ими берега. Эффективность бун, как и любого инженерного сооружения, конечно, зависит не только от знания общих закономерностей перемещения пляжевого материала, но и от местных условий. На детальном описании этих вопросов мы, естественно, не можем останавливаться. Укажем лишь, что буны способствуют образованию песчаных волн, которые ниже будут рассмотрены достаточно подробно.

Итак, мы говорили о переходе энергии волн в энергию бора и других течений, возникающих при разрушении волны. Закон-

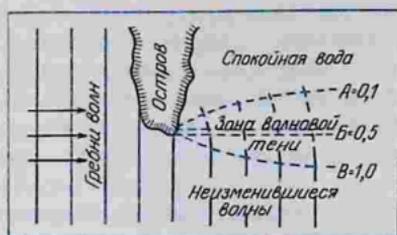


Рис. 44. Дифракция волн на краю острова. Справа проведены линии, на которых высоты волн составляют указанную долю высоты приходящих к острову волн

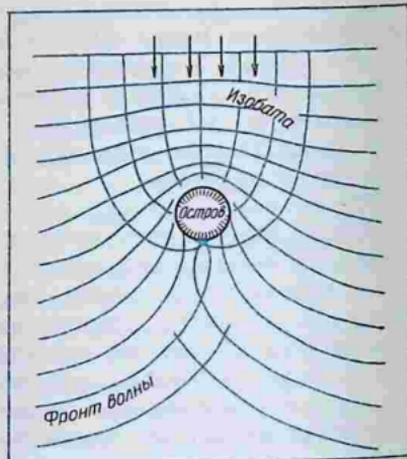


Рис. 45. Рефракция волн у острова

чим главу рассказом о волновых явлениях, обусловленных движением морских волн у берегов, — о дифракции и рефракции. Мы касались этих явлений в первой главе, но кратко, и к тому же тех, что можно наблюдать в эксперименте. Однако эксперимент — это эксперимент, в реальных условиях все сложнее.

Суда во время сильного волнения, находясь вдали от портов, стараются найти естественные укрытия от волн в подветренных бухтах за мысами или с подветренной стороны островов. Между тем даже если волны не меняют своего направления движения, они могут настичь суда и там, где, казалось бы, должна быть волновая тень. Прежде всего в этом может быть повинна дифракция. Мы уже видели, что благодаря этому явлению волны могут заходить в область тени. Например, если судно отстает в глубокой бухте за скалистым островом, то его капитан должен учитывать распределение волнения за островом, рассматривая остров как экран и учитывая законы дифракции на краю этого экрана.

Дифракционная картина для этого случая показана на рис. 44. Видно, что высота волн, входящих в бухту за островом, распределяется по разным направлениям достаточно сложно. Здесь уже наблюдение волновой картины на натуре происходит не сверху, как в безобидных лабораторных опытах, а наблюдатель непосредственно ощущает силу волн.

Оставаясь в бухте или под прикрытием острова, капитан должен учитывать и рефракцию волн, когда они переходят с глубокой на мелкую воду или когда движутся на мелкой воде с переменной глубиной.

Мы уже описывали в первой главе опыт с рефракцией волн на воде, создавая в сосуде искусственную отмель. В натуральных условиях профиль дна обычно не очень регулярен как в направлении от берега в море, так и в особенности вдоль береговой ли-

нии, и изобаты вовсе не повторяют в точности контур уреза воды, то есть линии, до которой доходит на пляже спокойная вода. Тем не менее достаточно регулярные волны подходят к берегу обычно параллельно линии уреза.

Но так бывает не всегда. Например, у небольшого острова с отмелями берегами условия таковы, что волны не могут располагаться параллельно линии уреза. Картина расположения фронтов тогда принимает вид, похожий на тот, что приведен на рис. 45. Конечно, высота волн на подветренной стороне острова будет ниже, чем на наветренной, но пересечение фронтов, обогнувших остров, может и здесь вызвать волнение, опасное для судна, которое попыталось бы укрыться в этом районе.

Иногда особенности строения дна на мелководье могут оказаться такими, что прибрежная отмель будет действовать как линза, концентрируя волны на узком участке берега. Для береговых сооружений такое концентрирование волн может иметь самые печальные, а главное, непредвиденные последствия. Если к берегу приходит даже невысокая зыбь по направлению, близкому воображаемой оси отмелой линзы, то примерно на продолжении этой оси могут возникнуть чрезвычайно высокие и разрушительные волны. Между тем уже буквально по соседству, в каких-нибудь десятках метров, к берегу будут приходиться лишь низкие волны.

КОРАБЛИ И ВОЛНЫ

...И острый ржавый нос,
 Не торопясь, своей броней железной
 В снегу взрезает синий купорос.

И. Бунин

Здесь мы расскажем о поведении судна на волнах (конечно, много более высоких, чем волны, создаваемые самим судном), а затем о том, как возникают волны при его движении в спокойной воде. И наконец, рассмотрим обтекание препятствий движущейся водой.

Первая тема является, в сущности, физической задачей о колебании некоторого тела под действием внешней силы, если угодно, задачей о маятнике. Только маятник этот особый, неточечный, как в школьном курсе физики, а сила от проходящих под ним волн прикладывается к нему не мгновенно и не в одной точке. Для решения трудной проблемы качки судна очень много сделал знаменитый русский математик и механик А. Н. Крылов, и с тех пор кораблестроители всего мира пользуются выведенными им уравнениями. Они позволяют определять поведение судна на волнах и используются при проектировании судов, которые не опрокидывались и не разрушались бы под действием собственного веса и ударов волн.

Мы можем описать лишь самые простые физические явления, происходящие при качке. Пусть вначале судно покоится на совершенно гладкой воде. Вывести его из состояния равновесия можно различными способами, например переместив груз из одного положения в другое, а затем вернув его обратно, иными словами, приложив силу в направлении, которое не совпадает с вертикальной прямой, проходящей через центр тяжести судна. Выйдя из положения равновесия, судно, если эти силы не слишком велики и оно не потеряло остойчивости, будет стремиться вернуться в состояние покоя, но по инерции проскочит его и отклонится в другую сторону. Так возникнут колебания его корпуса, которые потом постепенно затухают вследствие вязкости воды.

Период этих так называемых собственных колебаний судна будет зависеть не только от силы тяжести, но и от его инерции, которая выражается моментом инерции и связана с распределением масс на судне. Распределение бывает, конечно, различным от носа к корме и от правого к левому борту корабля. Поэтому период колебаний, как и в случае обычного маятника, зависит от длины и ширины корабля. Он оказывается неодинаковым для продольных колебаний (килевой качки) и поперечных (бортовой качки) и для первых будет намного больше, чем для вторых. Приложив силу в точке, которая не лежит ни на продольной, ни

на поперечной оси корабля, можно вызвать сложную качку одновременно с носа на корму и от борта к борту; ее период окажется промежуточным между периодами килевой и бортовой качки.

Когда появляется волнение, возникают вынужденные колебания судна. Внешняя сила действует на него уже не считанные мгновения, а в течение времени, которое значительно больше периода его собственных колебаний. И эта сила на регулярном волнении имеет периодический характер: нос судна сначала поднимается на гребень волны, а затем опускается в ее ложбину. Но периодичность по отношению ко всему корпусу судна оказывается более сложной. Если его продольные размеры превышают длину волны, набегающей на него по носу или по корме, то в пределах корпуса может оказаться несколько волн, и судно как бы повиснет на их гребнях. Естественно, что вес его в местах, располагающихся на гребнях, будет меньше, чем в местах над ложбинами. В результате вдоль судна будут двигаться волны распределения его веса, а значит, волны напряжений, которые испытывает его корпус.

Расчет напряжений очень важен для постройки кораблей, и не случайно еще в середине XVIII века Парижская академия наук объявила конкурс на решение задач по строительной механике корабля. Премию получил в 1770 году знаменитый математик и механик Эйлер за труд «Исследование усилий, которые должны выносить все элементы корабля во время боковой и килевой качки». Работа Эйлера существенно помогла при разработке рациональных конструкций судов — сначала деревянных, а потом и железных.

Для теоретического решения задач о качке судна на волнении приходится прибегать зачастую к существенным упрощениям. Морские волны, особенно штормовые, далеко не синусоидальные, да и сам корабль, вернее его погруженная в воду часть, имеет сложную форму. Поэтому для решения вопросов не только его конструкции, но и движения на волнении приходится строить и испытывать модели в специальных бассейнах, где искусственно создаются натурные условия. О ряде условий, которым должны удовлетворять такие модели, чтобы из их испытаний можно было получать надежные рекомендации, мы расскажем дальше.

Допустим, что волны идут по носу и их период больше периода качки судна. Тогда оно будет колебаться в фазе с волной: подниматься с нею на гребень и опускаться во впадину (рис. 46). Это соответствует тому, что мы наблюдаем, медленно раскачивая маятник — шарик на веревке. Двигая рукой, в которой зажата нить, взад-вперед, мы видим, что куда движется рука, туда отклоняется и шарик.

Однако если период волны меньше периода качки, то судно начнет колебаться в противофазе с волной. Оно будет опускаться на гребнях и подниматься во впадинах. Это очень неприятная

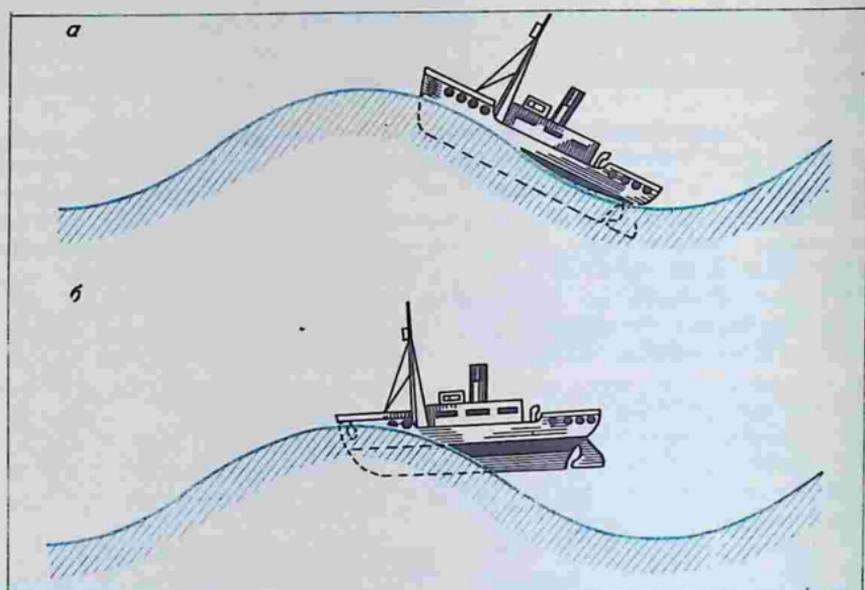


Рис. 46. Качка корабля на волнах: а — большого и б — малого периода

и даже опасная ситуация, знакомая многим морякам: судно зарывается носом в волну, а корма повисает в воздухе, и винты, потеряв нагрузку, бешено вращаются вхолостую.

Когда же период волн совпадает с периодом качки судна, возникает и вовсе опасное явление, называемое резонансом. Если бы не существовало трения судна о воду и некоторых других потерь энергии, то амплитуда его колебаний могла бы стать бесконечно большой. Трение судна о воду, естественно, зависит от формы сечения его корпуса. Сечение же всегда стараются сделать таким, чтобы трение было бы минимальным и чтобы судно не затрачивало слишком большой мощности на преодоление сопротивления воды. Поэтому борьба с резонансом сводится в основном к умелому маневрированию скоростью и направлением движения. Если этого не делать, то элементы корпуса судна могут не выдержать чрезмерных механических напряжений.

А теперь обратимся к тому, как выглядят волны, создаваемые самим судном на спокойной воде. Картина эта всем знакома, но ее стоит описать: вопреки привычной очевидности она отнюдь не проста. Прежде всего эта картина существенно различна для волн на глубокой и на мелкой воде и, конечно, зависит от того, движется ли судно по прямой линии или маневрирует.

Начнем с волн на глубокой воде. Рассматривая рис. 47, легко увидеть по крайней мере две системы волн: одна расходится под

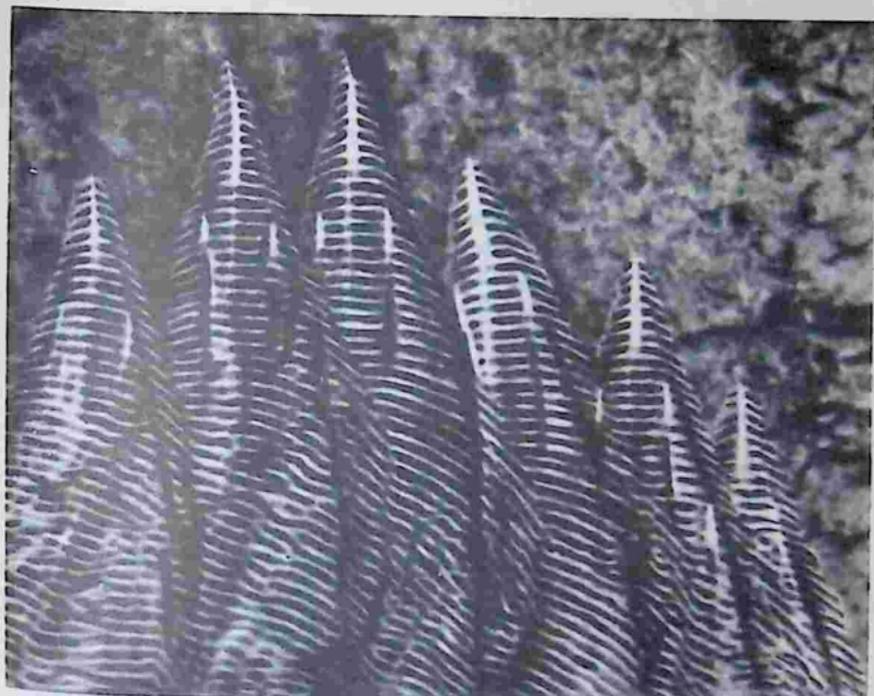


Рис. 47. Система волн, возбуждаемых судами при движении на глубокой воде

острым углом симметрично по обе стороны от носа судна, другая перпендикулярна направлению его движения. Если приглядеться, можно заметить еще две системы волн — это косые и поперечные волны, расходящиеся от кормы.

Из всех этих видов волн наиболее характерна косая носовая. Поперечную носовую волну иногда можно увидеть, находясь лишь сравнительно близко к судну (впрочем, с воздуха она хорошо видна). Косая кормовая волна часто очень слаба, а поперечную кормовую портит турбулентное движение воды, взвихренной судовыми винтами.

Поэтому мы начнем с носовых волн. Прежде всего, видно, что по одну сторону судна гребни волн почти параллельны друг другу, расположены как бы внахлест, частично заходя друг за друга, и не параллельны линии, на которой все они оканчиваются. Кроме того, выясняется очень интересное обстоятельство: угол, который образуют эти гребни с направлением движения судна (напомним еще раз, что речь идет о движении на глубокой воде), не зависит от его скорости и равен приблизительно 20° . Попытаемся хотя бы качественно объяснить эти особенности.

Нос судна — это в сущности импульсный источник волн и в этом смысле в принципе не отличается от бросаемого в воду камня. Разумеется, характер возбуждения волн в обоих случаях различный: камень, падая по вертикали, вызывает сначала опускание уровня воды, а нос судна вспарывает воду, создавая начальное повышение уровня. Поэтому вначале различно и само течение воды. Но уже спустя короткий промежуток времени различие условий возбуждения существенно сглаживается. И если мы могли бы бросать один за другим камешки в воду, имитируя движение судна, мы получили бы довольно похожую картину волн, по крайней мере тех, что расходятся от его носа.

Напомним, что падение одного камня в воду создает очень сложную волновую картину, меняющуюся в пространстве и времени. Когда же мы высыпем в воду горсть камешков, на эту картину накладывается еще и интерференция отдельных волн, возбужденных в различные моменты времени. Скорее, надо удивляться сравнительной простоте, а не сложности картины волн, возбуждаемых судном на глубокой воде.

Большое значение для этой простоты имеют два обстоятельства. Первое состоит в том, что наиболее быстрые волны не обгоняют судно и не отстают от него: их фазовая скорость равна скорости судна. Второе нам уже известно: групповая скорость волн составляет половину их фазовой скорости. Волновой след за судном образован именно группами волн, на которые «рассыпалась» возникшая волна. Но если от отдельного камня группы волн имели форму окружностей, то для «множества камней», которым мы заменили нос судна, возникает интерференция между ними. И результат ее оказывается примерно таким же, как и для волн от ряда вибраторов, когда мы с их помощью в первой главе имитировали колеблющуюся пластинку. Интерференция отдельных круговых волн (теперь уже групп волн) выстраивает их в плоские волны.

Приблизительно рассчитать характерные особенности плоских волн можно с помощью довольно простых соображений (рис. 48). Допустим, что судно, находясь в некий начальный момент в точке O , движется по прямолинейной траектории со скоростью v . В точке O возникает возмущение, которое бежит с фазовой скоростью c_f во все стороны, в том числе и вдоль движения судна, причем, как мы уже сказали, $c_f = v$. Группы волн будут распространяться медленнее, со скоростью $1/2 v$.

Область распространения возмущения, отвечающего группам волн, можно изобразить в виде окружности радиусом $1/2 vt$, где t — теперешний момент. Ясно, что чем ближе к носу судна, тем меньше размеры этой области, пока у носа она не превратится в точку. На краях области возмущения, очевидно, должны лежать концы фронтов групп волн. Легко определить угол который составляют прямые, очерчивающие эти границы, с курсом судна. (То, что это прямые, легко понять на основании принципа Гюйгенса — Френеля, описанного в первой главе.) Посколе

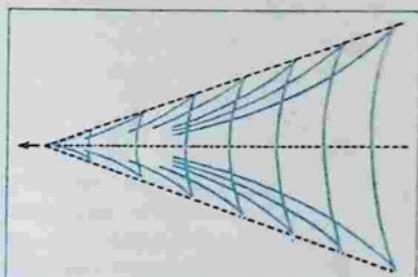
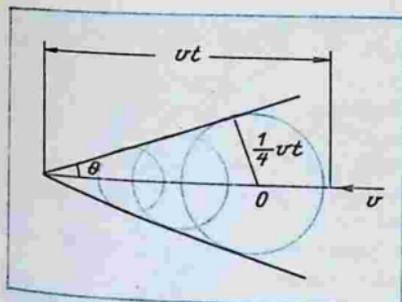


Рис. 48. Распространение возмущения (носовой волны) от судна на глубокой воде

Рис. 49. Вычисленная картина распространения корабельных волн на глубокой воде

ку за то время, что судно прошло путь vt , область «группового» возмущения прошла путь $\frac{1}{2} vt$, а радиус окружности равен $\frac{1}{4} vt$, то, как видно из рис. 48, $\sin\theta = \frac{1}{3}$, или $\theta = 19,5^\circ$. Этот угол и на самом деле не зависит от скорости судна и очень близок к тому, что наблюдается в действительности.

Плоский фронт групповой волны к этому времени достигнет положения, когда его концы окажутся на границах области возмущения. Отсюда легко вычислить угол φ , который фронт составляет с этой границей. Он равен $\frac{1}{2}(90^\circ - \theta) \approx 35^\circ$. Наблюдаемые в действительности его значения составляют от 35 до 38° .

Разумеется, столь простые соображения не дают возможности получить более точную картину. Красивое (но тоже приближенное) решение задачи о корабельных волнах выполнил в конце прошлого века великий английский физик Уильям Томсон (лорд Кельвин). Его решение в графической форме показано на рис. 49. Сравнивая этот чертеж с той картиной, что наблюдается в действительности, нельзя не поразиться их согласию.

Видные на рис. 49 поперечные волны, двигаясь с групповой скоростью $\frac{1}{2} v$, отстают от судна. В результате интерференции между носовыми и кормовыми поперечными волнами может возникнуть либо особенно высокая, либо, наоборот, низкая задняя волна. Поэтому при проектировании любых судов надо учитывать соотношение между их длиной и выбранной крейсерской скоростью движения. Оптимальным соотношением, конечно, будет такое, при котором обе поперечные волны складываются в противофазе. Тогда снизится часть мощности двигателя, расходуемая судном на образование волн.

Когда судно выходит на мелкую воду (мелкую, конечно, не по его осадке, а по отношению к длине возникающих волн, которая имеет порядок длины судна), картина волн радикально меняется. Теперь уже построение, сделанное на рис. 48, не годится: дисперсия волн, как мы знаем, исчезает, и фазовая скорость сближается с групповой. Чертеж при этом внешне похож

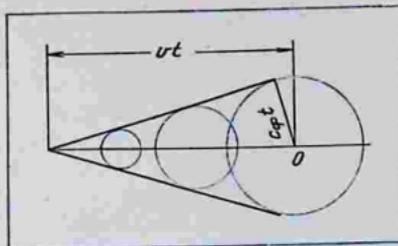


Рис. 50. Распространение возмущения (носовой волны) на мелкой воде от судна, идущего со скоростью, большей фазовой скорости волн



Рис. 51. Волны при движении быстрого судна на мелкой воде

на старый, но получает совершенно другой смысл (рис. 50). Прежде всего линия, проведенная из того места, которое занимает нос судна в данный момент, в точку, куда дошла волна, созданная в точке O , приобретает смысл фронта волны. Радиус окружности возмущений теперь равен $c_{\phi}t$ (все волны идут с одной скоростью и групп не образуют). Но тогда, как легко видеть,

$$\sin \theta = \frac{c_{\phi}}{v}, \quad (22)$$

то есть угол «усов» с траекторией судна зависит уже от его скорости, точнее, от отношения скорости к скорости распространения волн. Такой же вид, естественно, приобретает и кормовая косяя волна. Поперечные волны исчезают вовсе.

Что же произошло? Волны «почувствовали» дно, и вся картина распределения частиц воды совершенно изменилась. Поскольку корабль движется быстрее волн (синус всегда меньше или равен 1, так что $v > c_{\phi}$), он встречает еще «не ведающую» о его движении воду. Фронт волны приобретает вид «усов», то есть образуется волна, похожая на ударную волну в газе, только, естественно, лишь на поверхности воды, а не в ее глубине (рис. 51).

Кстати, заметим, что такие же волны, только уже не на поверхности воды, а в воздухе, то есть звуковые волны, возникают при движении снарядов или самолетов со скоростью, превышающей скорость распространения звука, с так называемой сверхзвуковой скоростью.

Рассмотрим, что происходит, если скорость судна v по значению приближается к скорости c_{ϕ} волн на мелкой воде. При небольшой скорости картина напоминает ту, что имеет место на глубокой воде: наблюдаются и косые, и поперечные волны. Однако по мере возрастания скорости судна косые волны ослабевают, но зато возрастает высота поперечных волн, они становятся все более заметными, особенно если их наблюдать по бор-

там судна. Косые волны, увеличивая угол с направлением движения судна, начинают сближаться с поперечными. В конце концов когда скорость судна составит примерно 0,8 или 0,9 скорости волн, останется практически лишь одна поперечная волна, идущая либо по носу, либо по корме.

Возникшая волна, называемая спутной, имеет характерные особенности. У нее есть только горб, но нет впадин. Волна такой формы нам уже знакома: это уединенная волна, солитон. Она движется вместе с судном, скорость ее распространения равна скорости судна, поэтому волну и называют спутной. (Впрочем, если в этот момент судно резко замедлит свой ход, волна оторвется от него и побежит вперед самостоятельно с прежней скоростью.)

Если скорость судна u превышает c_f , то спутная волна расщепляется на две, и при дальнейшем увеличении u крылья волн начинают вновь сближаться, образуя друг с другом все более острый угол. Такую картину мы видели на рис. 51, она описывается формулой (22).

Образование спутной волны называют иногда «эффектом лошади Хьюстона». Вот как описывает его У. Томсон:

«Это открытие было сделано случайно на небольшом канале между Глазго и Ардроссаном. «Умная» лошадь тянула баржу эсквайра Вильяма Хьюстона. Вдруг хозяин лошади с изумлением заметил, что баржа движется необычно быстро. Лошадь тянула ее с гораздо меньшими усилиями, чем обычно, так как бежала со скоростью распространения волн. При этом кильзатерная волна, обычно выплескивавшаяся на берега, исчезла. М-р Хьюстон понял, какую выгоду сулит это «лошадиное открытие» компании, владеющей транспортом на канале. С тех пор буксировка барж по каналу ведется с большей скоростью, и доход компании увеличился немало. Баржа начинает двигаться с небольшой скоростью за волной, и лошади по сигналу рывком вытаскивают ее на вершину волны, где благодаря меньшему сопротивлению баржа движется со скоростью 7, 8 или 9 миль в час».

В чем тут дело? Движущееся судно, будучи частично погруженным в воду, испытывает, естественно, сопротивление воды. Часть совершаемой им работы расходуется на трение, другая часть — на образование вихрей в воде, турбулилизацию жидкости, третья и притом значительная часть — на образование волн.

Судно совершает работу над спокойной водой, поднимая вверх носом и опуская вниз кормой определенную массу воды. Но в волне есть такие участки, на которых такая работа не совершается. Когда скорость судна u приближается к скорости волн c_f , судно в узком водоеме может подняться на гребень спутной волны, где ему не потребуется совершать работу над водой, повышая или понижая ее уровень. Естественно, в этом случае для движения судна нужна меньшая мощность. Именно этот эффект уменьшения мощности и использовала «умная» лошадь.

При $u \approx c_f$ мощность двигателей судна в значительной мере

тратится на создание спутной волны. Если попытаться в широком водоеме плавно увеличить скорость судна, перейти через значение $v = c_f$, повышая мощность на гребном валу, то из этого ничего не выйдет. Спутная волна будет вздыматься все выше, а скорость судна меняться не будет.

По воспоминаниям знаменитого кораблестроителя академика А. Н. Крылова, такая ситуация сложилась во время испытаний быстроходного миноносца в Черном море в годы первой мировой войны. Командир корабля, видимо, не подозревал о существовании спутной волны и проводил испытания в мелководном заливе, где глубина составляла около 20 м. Как ни старались увеличить скорость корабля выше примерно 45 км/ч (а по техническим условиям миноносец должен был развивать крейсерскую скорость около 50 км/ч), ничего не получалось. Машины корабля работали в форсированном режиме на мощности, чуть ли не в полтора раза выше крейсерской, но это привело лишь к образованию огромной волны, бежавшей за кораблем. Из-за опасности взрыва котлов испытания пришлось прекратить. Впоследствии их провели на глубокой воде, и они прошли вполне успешно.

Преодолеть критическую область скоростей $v \leq c_f$ можно, быстро, рывком набирая скорость.

При $v > c_f$ значительная часть мощности двигателя будет, разумеется, тратиться на образование волны, похожей на ударную.

Расход мощности на волновое сопротивление движению судна тщательно исследовал в середине прошлого века английский ученый В. Фруд.

Ясно, что это сопротивление должно зависеть от площади судна, погруженной в воду, его скорости и ряда других факторов. Можно ввести особую величину, отражающую влияние силы тяжести и сил инерции судна при его движении в воде. Фруд и ввел такую величину, и в честь его ее назвали числом Фруда. Оно равно

$$Fr = \frac{v^2}{gL}, \quad (23)$$

где v — скорость судна, g — ускорение силы тяжести, а L — какой-нибудь характерный размер судна, например длина.

Для реальных судов определить волновое сопротивление расчетом невозможно, поэтому в специальных бассейнах испытывают уменьшенные их модели. И тут возникает вопрос: каких размеров следует делать модель, чтобы создаваемая ею волновая картина была подобна той, что вызывает реальное судно?

Фруд доказал, что образование волн от модели и от судна будет одинаковым, если в обоих случаях числа Фруда равны, то есть

$$\left(\frac{v^2}{L}\right)_{\text{модели}} = \left(\frac{v^2}{L}\right)_{\text{судна}} \quad (24)$$

Отсюда получается, что модель следует буксировать по бассейну со скоростью, которая во столько раз меньше скорости судна, во сколько раз различаются корни квадратные из их размеров. Отношение самих же волновых сопротивлений модели и судна тогда будет пропорционально отношению их объемов (водоизмещений).

По этим соотношениям с помощью результатов, полученных на моделях, и рассчитывают волновые сопротивления для реальных судов. Можно добавить, что волновое сопротивление тем больше, чем выше скорость движения судна. Если судно движется медленно, волновое сопротивление составляет лишь небольшую часть общего сопротивления среды (трения). С ростом скорости растет и эта доля, пока, наконец, не становится главной. Отсюда нетрудно сделать практический вывод: для судов обычной конструкции одним из существенных условий быстротходности является наилучшая обтекаемость корпуса и пониженная его способность к образованию волн. А так как основную роль в волнообразовании играет нос судна, то задача конструктора сводится к выбору его оптимальной формы.

Можно сказать, что такая оптимальная форма настолько же отличается от наиболее красивого «греческого» или «римского» носа на лице человека, насколько скорость современных гоночных яхт отличается от скорости древнегреческих или древнеримских парусников. Нос большинства гоночных яхт имеет достаточно искривленную и сильно нависающую над водой форму. На современных моторных кораблях обычной конструкции уже практически достигнут возможный предел уменьшения волнообразования.

Дальнейшее повышение скорости стало возможным только за счет резкого снижения или сведения почти к нулю полного сопротивления, и волнового в том числе, то есть уменьшения погруженной в воду площади судна. Так родились глиссеры, суда на подводных крыльях и корабли на воздушной подушке.

Глиссер имеет такую конструкцию, что в неподвижном состоянии он несколько глубже погружен кормой, чем носом (как говорят, имеет дифферент на корму). При его движении поэтому возникает подъемная сила, задирающая нос судна. Пока число Фруда меньше единицы, глиссер идет как обычное судно. Выход носа из воды, переход в режим глиссирования достигается с увеличением F_r до 3 и более. Образующие им волны постепенно меняют свой характер. Вместо сильной вначале косой носовой волны, исчезающей, когда нос поднялся над водой, рождается все более сильная «донная» волна. Дно глиссера в месте соприкосновения с водой толкает вперед водяной «бугор», усиливается и кормовая волна, так что в режиме глиссирования наиболее заметны лишь поперечные волны.

Наконец, когда $F_r > 5$, подъемная сила начинает настолько превышать вес глиссера, что он выскакивает из воды, пролетает некоторое расстояние и затем на короткий миг снова опускается

на воду, вызывая волны, подобные тем, которые каждый из нас, вероятно, наблюдал сам, бросая плоские камни так, чтобы они скользили по водной глади.

Крылатые суда отличаются от глиссеров главным образом тем, что для создания подъемной силы у них используется не дно, а специальные крылья сравнительно небольшой площади. Крылья и выступающие из воды кронштейны, на которых они подвешены, столь эффективно «режут» воду, что наряду с обычными носовыми волнами возникают «усы» из брызг. Разрыв воды вызывает появление дополнительного сопротивления из-за кавитации — образования в воде полостей, которые заполняются паром и растворенным в воде воздухом. Если крыло слишком приблизится к поверхности воды, то в такую полость может прорваться и наружный воздух, давление над крылом повысится, а подъемная сила упадет. Если воздух совсем оттеснит воду над крылом, то может возникнуть даже глиссирование.

У судов на подводных крыльях, идущих с большой скоростью, обычно значительно превышает скорость волн на мелкой воде, наблюдается сильная «крыльевая» косая и сильная поперечная кормовая волна. Интересно, что в отличие от обычных «полнопогруженных» кораблей суда на подводных крыльях чувствуют себя на попутной волне хуже, чем на встречной. Дело в том, что движение частиц в волне накладывается на горизонтальное движение крыла и изменяет его угол атаки по сравнению с углом для спокойной воды. Обычно этот угол составляет $1 - 2^\circ$. Если на море развилось волнение силой до 4 баллов, а это волны высотой примерно до 2,5 м, то они могут менять угол атаки на скорости движения судна 90 км/ч до $2 - 4^\circ$, так что подъемная сила может упасть даже в 2 раза. Если судно идет против волн, то они стремятся поднять его нос (действуя на крылья) на гребне и опустить на впадине, в результате чего подъемная сила на гребне возрастает. На попутной волне, наоборот, нос опускается на гребне (рыскает) и поднимается над впадиной, что снижает подъемную силу крыльев.

От превратностей морского волнения защищены суда на воздушной подушке, но и они, как это ни странно на первый взгляд, тратят часть своей мощности на преодоление волнового сопротивления. Когда такое судно идет над водой, то его воздуходувки, нагнетающие воздух под судно, создают там повышенное давление, которое прогибает поверхность воды, потом прогиб заполняется водой. Так возникает вытянутая вдоль пути судна система кольцевых волн. По своему происхождению (но не масштабам!) она в сущности не отличается от системы волн, возникающих во время прохождения над морем небольшого антициклона.

Теперь надо рассказать о происхождении так называемой мертвой воды. Это явление называется еще эффектом Холлов — по имени двух братьев, изучавших его еще в 1830 году. Больше чем полвека спустя объяснение его предложил норвежский ученый В. Экман, а потом исследования других ученых, в первую

очередь советского ученого-механика Л. Н. Сретенского, позволили окончательно выяснить его природу. Явление заключается в том, что медленно движущиеся суда, например небольшие катера или рыбацкие лодки, неожиданно застревают в воде. Начинают энергичнее работать веслами или повышают число оборотов двигателя — и никакого эффекта! «Мертвая вода» довольно часто встречается у берегов Норвегии, где в глубокую и неподвижную морскую воду фиордов стекает и слоем над ней располагается менее плотная пресная вода горных рек.

Судно, двигаясь в пресной воде, создает местное повышение давления, которое прогибает границу раздела пресной и соленой воды. На границе возникают небольшие внутренние волны. Когда гребень волны окажется под килем судна (а внутренние волны движутся очень медленно), судну приходится как бы толкать перед собой внутреннюю волну, и волновое сопротивление достигает максимума при критической скорости судна

$$v_{кр} = \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho_2} H_1}, \quad (25)$$

где ρ_2 — плотность морской воды, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, ρ_1 — плотность пресной воды, а H_1 — толщина ее слоя. Если сравнить это выражение с формулой (18), то можно убедиться в их тождественности: критическая скорость судна совпадает со скоростью внутренних волн.

Возникает уже знакомое нам явление: когда скорость судна совпадает со скоростью поверхностных волн на мелкой воде, судно тратит почти всю мощность своих двигателей на образование спутной волны. В сущности, то же самое имеет место и при возбуждении внутренних волн, и в результате судно застревает в «мертвой воде».

«На просторе» (не в канале!), если $v > v_{кр}$, всегда найдутся косые волны, которые будут возбуждаться судном и отходить от него под углом θ , определяемым формулой (22). Можно подсчитать, что, например, при $H_1 = 4$ м (примерно глубина киля малого судна) и $\Delta\rho/\rho = 0,03$ значение $v_{кр}$ оказывается близким к 3 км/ч. Вот почему во избежание явления «мертвой воды» рекомендуется двигаться со скоростью по крайней мере не меньше 5 км/ч.

Если же граница между слоями соленой и пресной воды располагается существенно ниже киля судна, то вероятность того, что оно «зацепит» килем гребень внутренней волны и «потящит ее за собой», существенно уменьшается.

К этому остается еще добавить, что явление «мертвой воды» может угрожать не только надводным, но и подводным кораблям, если они окажутся в непосредственной близости от скачка плотности на внутренней границе слоев более и менее соленой (или холодной) воды. Но подводные лодки имеют в общем случае то существенное преимущество перед надводными кораблями, что могут, погрузившись или поднявшись, выйти из зоны скачка

плотности и тем самым избежать возникновения внутренних волн.

Однако такое преимущество не всегда удается реализовать. Существует гипотеза, согласно которой причиной гибели американской атомной подводной лодки «Трешер» были именно внутренние волны. Мы уже говорили о том, что внутренние волны могут вызываться метеорологическими факторами. В данном случае таким фактором мог оказаться мощный циклон, образовавшийся в результате воздействия на морские течения сильное вихревое движение воды, отмеченное в районе погружения «Трешера». Распределение холодной и теплой воды могло резко измениться по сравнению с обычными условиями, и лодка должна была быстро очутиться в слое более легкой воды, то есть провалиться в буквальном смысле этого слова.

Обычно избежать уменьшения плавучести судна, когда оно выходит в слой менее плотной воды, можно, продув балластные цистерны и тем самым уменьшив вес лодки. Но здесь могло сыграть роль и другое обстоятельство. Тот самый циклон, который нарушил нормальную циркуляцию морской воды, мог создать сильные внутренние волны. Вообще о внутренних волнах, возникающих в природных условиях, известно еще очень мало. Можно предположить, что тогда, когда погибла лодка «Трешер», их высота достигала почти 100 м, а период составлял около 8 мин.

Лодка, шедшая со скоростью 9 — 10 км/ч, достигнув края вихря, могла оказаться на этой гигантской внутренней волне и потерять ход. Вероятно, что-то помешало экипажу быстро продуть цистерны и подняться на безопасную глубину. В результате лодка погрузилась слишком глубоко (глубина моря в месте ее гибели свыше одного километра) и затонула из-за разрушения ее корпуса чрезмерно большим давлением воды.

В заключение этой главы мы рассмотрим возникновение гравитационно-капиллярных волн (или волн ряби) при движении небольших предметов в воде (или, что то же самое, при обтекании препятствий водой). Такие явления нередко наблюдаются в ручьях и мелких реках. Вспомним особенность «смешанных» волн, о которой мы рассказывали в первой главе. Мы видели, что у волн короче примерно 1,7 см, с фазовой скоростью 23 см/с групповая скорость больше фазовой, а для волн с большей длиной — меньше.

Рассмотрим, что происходит на воде, обтекающей торчащий из воды прутик или опущенную удочку. Пока скорость течения воды не достигнет 23 см/с, образующиеся волны будут оставаться рядом с предметом, а их высота будет примерно постоянной (рис. 52). Как и в случае, когда скорость судна на мелководье меньше скорости волн, эти волны будут находиться позади предмета по отношению к течению (то есть позади предмета, если бы он сам двигался в неподвижной воде).

Если скорость течения сравнится с критической, при которой

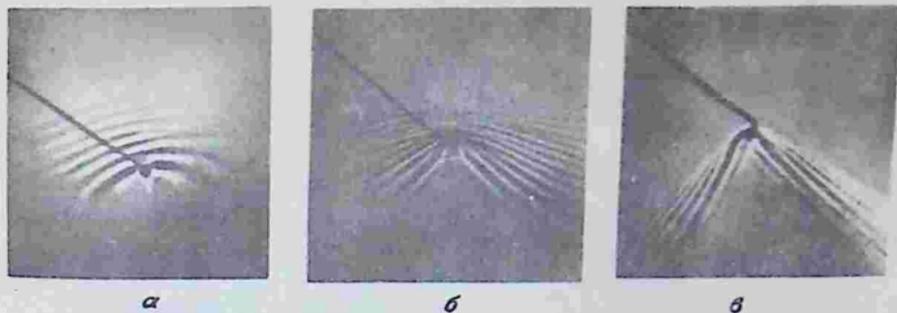


Рис 52. Волны ряби при обтекании прутика: а, б, в — соответствуют возрастающей скорости течения воды

фазовая и групповая скорости совпадут и будут равны 23 см/с, волны, собираясь у предмета, будут усиливать друг друга. Длины этих волн заключены в довольно узком интервале — примерно от 1,5 до 2 см.

Пусть скорость течения еще немного увеличится. Теперь вместо одной отчетливой волны образовалось несколько «неподвижных». (Тут надо напомнить, что волны неподвижны относительно наблюдателя, а не потока; если бы предмет двигался в неподвижной относительно наблюдателя воде, то все эти волны двигались бы с ним.) Волны распространились несколько дальше, потому что в этой области скоростей групповая скорость больше фазовой.

Пусть скорость течения стала еще больше. Мы замечаем, что неожиданно появились волны, похожие на те, что возникают, когда судно идет по глубокой воде, только отогнутые назад по течению. Заметна и существенная разница: волны сначала видны и перед предметом и только при большой скорости стягиваются спереди к предмету. Косые носовые волны тоже выглядят иначе: относительно «усов» они вывернуты в обратную сторону по сравнению с волнами от судна. Объясняется это различие все той же причиной: групповая скорость волн больше фазовой.

К тому моменту, когда фронт отдельной волны дойдет до некоторой точки M (рис. 53), фронт группы волн дойдет до точки M' . Если из точки P к точкам M и M' провести две пары «усов», то ясно, что фронт групп будет располагаться параллельно PM (в сущности, то же самое было и для волн от судна, когда OM' было меньше OM , и лишь на мелкой воде, когда OM' и OM совпадали, фронт группы совпадал с фронтом отдельных волн).

Рассмотрите рис. 52. Прежде всего видно, что длина волн ряби постепенно все более уменьшается: поскольку волны ряби относительно предмета неподвижны, они должны все время увеличивать свою скорость, иначе течение «снесет» их назад. А

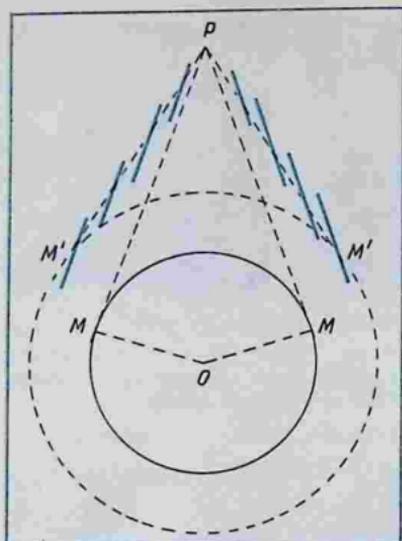


Рис. 53. Схема образования волн при обтекании мелких препятствий

это, в свою очередь, достижимо, если они сокращают свою длину.

Далее, видно, что длина волн непостоянна и увеличивается по мере того, как растет угол между направлениями течения и распространения ряби. И это понятно: чем больше угол, тем меньше проекция направления скорости течения на направление распространения ряби, пока, наконец, при угле 90° она не обратится в нуль. Но это означает, что «усам» ряби, чтобы удержаться около предмета, по мере их заворачивания нужна все меньшая скорость, а значит, увеличивается их длина волны. Конечно, длина волн растет не до бесконечности: когда проекция скорости течения приближается к критическому значению 23 см/с, длина волн становится почти постоянной и равной 1,7 см. В то же время длина волн в точках перед предметом может при большой скорости течения оказаться в несколько раз меньше, так что в конечном итоге там удастся заметить глазом только одну довольно высокую волну.

ВОЛНЫ НА ПЕСКЕ

Здесь жизнь была. Смеялось море
В ответ на ласку ветерка.
А ныне лишь морщины горя
На лике донного песка.

В. Розанов

Посмотрите на фотографию (рис. 54). Она очень напоминает мелкую рябь на воде. Но это волны не на воде. Это песчаные волны.

Зададим вопрос: в чем же главное отличие волн на песке от волн на воде?

Первый ответ будет наверняка тривиальным: одни волны состоят из песка, а другие — из воды. Ну и что из этого следует? Мы знаем, что песок при определенных условиях может течь почти как вода.

Тогда скажем так: песок состоит из отдельных частиц, а вода «сплошная».

Опять же что из этого следует? Вода, если вдуматься, тоже не сплошная, а состоит из отдельных частичек — молекул и даже более крупных агрегатов, образованных тысячами молекул. Правильно, но ведь силы сцепления между молекулами воды намного больше сил сцепления между песчинками? Так, это уже ближе к истине. Остается сделать последний шаг: тот эстафетный механизм, благодаря которому передается энергия в волне на воде, между частицами песка из-за малого сцепления между ними не действует. Правда, мы дальше увидим, что некая эстафета передачи движения от одних частиц песка к другим все же существует, но она не имеет ничего общего с той, что действует в воде.

А раз так, то передачи энергии в песчаных волнах не происходит. Они несамостоятельные волны и не могут сами поддерживать свое движение, распространяться независимо от того, продолжает или прекратил свое действие их источник. В отличие от «активных» волн на воде волны на песке «пассивны», возникают и движутся, пока действует образующий их источник — движение воздуха или воды. Но зато они способны на то, что не могут сделать волны на воде: замереть, запечатлеть себя на сколь угодно долгий срок, когда прекращает действовать порождавшая их причина.

В этом и состоит главное отличие волн на воде от волн на песке или на снегу. Сколь бы ни были внешне похожи формы волн на песке и на воде, все же песчаные волны — не столько отражение свойств среды, сколько «след» влияния внешних факторов: движения воздуха или течения воды над песчаной поверхностью.



Рис. 54. Песчаные волны

Может быть, волны на песке образуются в результате того, что сам воздух или вода над песком совершают волновое движение? Действительно, это одна причина появления песчаных волн. Но не единственная и не главная. Песчаные волны могут возникать и тогда, когда движение воздуха или воды вовсе не является волновым, а представляет собой поступательное течение. Может быть, эти течения так «выглаживают» поверхность песка, что она приобретает волнистый характер, то есть в одном месте вдавливают, а в другом вспучивают ее?

Нет, это невозможно. Хотя между песчинками и не действуют молекулярные силы сцепления, все же они связаны друг с другом силами, возникающими при их соприкосновении. Песчинки в общем имеют неправильную форму и цепляются друг за друга своими выступами. Это создает довольно значительную

силу трения между ними: из песка можно построить довольно крутые горки с углом откоса, достигающим у сухого песка до 30° . (Для сравнения: из песка, пропитанного водой, можно сделать и отвесные и даже «обратно наклонные» горки с углами откоса за 90° . Вот где работает куда более сильное молекулярное сцепление в пленке воды, обволакивающей песчинки!) Песок весьма вязкая, если можно так сказать, среда.

Но эту вязкость можно легко снизить почти до нуля: достаточно поднять песчинки хотя бы на короткое время в воздух или взмутить воду. Тогда песок и начинает течь. Таким способом его перемещают с помощью транспортеров с вибрирующей лентой. Разумеется, при этом понятие среды приобретает несколько неопределенный характер: взвесь песка в воздухе, особенно если насыщенность его песчинками высокая, — это и не песок и не воздух. В равной мере то же относится к взвеси песка в воде, которая имеет специальное название «пульпа».

Все изменения формы песчаной поверхности, вызываемые воздухом или водой, возникают только при отрыве песчинок от этой поверхности и переносе их в другие места. Но если в воздухе или воде нет волн, то каким же образом равномерный на первый взгляд перенос песчинок может привести к возникновению песчаных волн?

На этот наиболее трудный вопрос мы и попытаемся ответить сначала. Начнем с потока воздуха над песком.

Помните, когда речь шла о ветровых волнах на воде, мы касались вопроса, как вообще горизонтальное течение воздуха может вызвать «зародыши» волн? Ответ был такой: даже самое спокойное на первый взгляд течение воздуха является неоднородным, турбулентным, в нем образуются вихри различных масштабов. Причем эти масштабы тем крупнее, чем больше скорость течения воздуха. Скорость ветра над поверхностью воды, даже если поверхность абсолютно гладкая, не одна и та же на разных высотах: у поверхности воздух тормозится в результате трения о воду, по мере удаления от поверхности трение ослабевает и скорость ветра растет.

Самые маленькие вихри в воздушном потоке образуются возле поверхности, а чем дальше от нее, тем вихри крупнее. Но что такое эти вихри? По существу это пульсации давления воздуха.

Пульсации давления в турбулентном потоке воздуха могут морщить воду. Но они не могут морщить поверхность песка, вдавливать или вспучивать ее, поскольку силы сцепления лежащих песчинок велики. Действительно, пока скорость ветра очень мала, он не может преодолеть силу трения покоя между песчинками.

Но вот скорость ветра возросла. Что произойдет? Песчинки тронутся в путь. Песок состоит из частиц самых разных размеров, обычно от миллиметра и меньше. Первыми, естественно, начнут двигаться самые мелкие частицы: сначала короткими

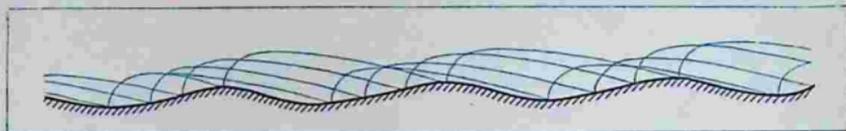


Рис. 55. Траектории поднятых ветром частиц песка

перебежками, перекатываниями по поверхности, небольшими подлетами вверх. Эти движения вызваны пока еще лобовым давлением ветра на наветренную поверхность песчинок. Увеличим еще немного скорость ветра. Теперь мелкие частицы уже начинают взлетать в воздух, а крупные все еще переползают по поверхности.

Присмотримся внимательнее к тому, что творится с мелкими частицами (рис. 55). Когда они находятся в воздухе, они движутся под действием двух сил — горизонтально направленной силы от ветра и вертикально направленной силы тяжести, наподобие маленьких горизонтально запущенных с горки снарядов. Ясно, что, пролетев некоторое расстояние, они снова упадут на поверхность песка. Самое важное состоит в том, что в воздухе они испытывают турбулентные пульсации силы ветра. Поэтому одни частицы полетят быстрее, другие — медленнее. И еще вот что важно: воздушные вихри следуют друг за другом довольно регулярно. И благодаря этому в потоке песчинок, несомых ветром, тоже устанавливается некая регулярность — закономерное чередование областей с высокой и низкой концентрацией частиц в воздухе. Естественно, что такая периодичность сохранится и в распределении концентрации песчинок в месте их падения.

Но на этом дело не кончается. Упавшая частица сохраняет запас набранной от ветра кинетической энергии и передает ее тем частицам, с которыми она столкнулась, упав на поверхность. Она подбрасывает в воздух другую частицу, та, упав, бьет в свою очередь третью и так далее.

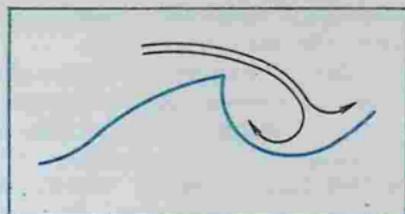
Вот как выглядит эстафета передачи энергии при образовании песчаных волн!

Постепенно накапливаясь в местах наибольшей концентрации упавших частиц, песчинки создают низенькие барьерчики. Около них начинают сосредотачиваться переползающие по поверхности крупные песчинки. Регулярность вихрей в воздушном потоке у поверхности песка начинает обрывать «плотью» — превращается в периодичность песчаных валиков.

Как только образовались «зародыши» волнообразного рельефа, начинается рост их в высоту. Это происходит благодаря тому, что выбитые с поверхности «вторичные», «третичные» и т. д. мелкие песчинки планируют в воздухе в среднем на такие расстояния, которые примерно совпадают с длиной возникающих волн песчаной ряби.

Но вот рябь выросла до заметных размеров. Теперь уже она

Рис. 56. Характерная форма гребней песчаной ряби



сама начинает вносить турбулентность в поток пронесшегося над ней воздуха. На подветренной стороне гребней ряби, в зоне тени, образуется присоединенный вихрь — круговое движение воздуха, которое у поверхности песка направлено против течения воздуха. Оно подгоняет песок из ложбины к гребню, делая его более четко оформленным, а главное подпертым, устойчивым. Так горб песчаной волны приобретает характерную несимметричную форму зуба пилы (рис. 56).

В пользу такого механизма образования песчаной ряби говорит один интересный эксперимент. С помощью сита или каким-либо другим способом расклассифицируем частицы песка на отдельные фракции (чтобы каждая фракция состояла из песчинок примерно одинакового размера). Внесем какую-либо фракцию в аэродинамическую трубу и создадим в ней поток воздуха с такой скоростью, при которой возникает рябь на «естественном» песке. Эта скорость обычно составляет 4—5 м/с. Что будет происходить? Песчинки придут в движение: будут отрываться от поверхности, падать, выбивать со своих мест другие — словом, все будет так, как на натуре. Только вот песчаной ряби не будет!

Окрасим теперь частицы каждой фракции в разные цвета в таком, к примеру, порядке: самые крупные — синим, помельче — зеленым, самые мелкие — красным. Тщательно смешаем снова все фракции, высыпем слоем на дно аэродинамической трубы и включим воздуходувку — скорость воздушного потока должна быть такой же, как и в первой части эксперимента. Сквозь прозрачные стенки трубы мы увидим, как только что «гладкая» поверхность песчаного слоя станет покрываться рябью. А если теперь выключить воздуходувку, то механизм образования ряби предстанет перед нами во всей своей красочной наглядности: гребни волн ряби стали синими; откосы с подветренной стороны — красными; наветренный склон гребня снизу вверх постепенно желтеет, становится зеленым и, наконец, переходит опять в синий. О чем это говорит? О том, что гребни образованы крупными частицами песка, а ложбины выложены мелкими.

Вот почему не получилась рябь на песчинках примерно одинакового размера. Для ее возникновения нужны как минимум две фракции песчинок: мелкие делают «канву» рисунка, на которую крупные наносят стойкий «узор». После этого роль мелких частиц в значительной мере исчерпана, и ветер постепенно сду-

вает их с гребней в ложбины, а потом на подошвы наветренных склонов песчаных волн.

Такую гипотезу возникновения ряби на песке выдвинул советский ученый М. А. Великанов в 1955 году, и сегодня ее приняло большинство исследователей.

Волны песчаной ряби можно характеризовать теми же геометрическими величинами, что и волны на воде, — длиной волны, высотой и крутизной. Разумеется, песок не вода, и на разных территориях имеет разное распределение песчинок по размерам. От этого распределения, конечно, зависит и то, как изменяются длина и высота волн при разных скоростях ветра. На одних песках длина волн с ростом скорости ветра увеличивается быстрее, на других медленнее. Она имеет для ряби порядок величины примерно 15 см и даже более при скоростях от 4 до 9 м/с, высота волн может достигать 8 см (по данным для песков туркменских пустынь).

Можно ввести и аналог фазовой скорости перемещения волн на воде (о групповой скорости и говорить не приходится — в песчаных волнах нет переноса энергии), понимая ее здесь как скорость перемещения формы ряби под действием ветра. (Разумеется, эта аналогия очень условна, так как здесь с фазой в отличие от волны на воде переносится и вещество — сам песок.) Эта скорость довольно мала, но растет со скоростью ветра. Например, туркменские пески движутся со скоростью около 20 см/ч, если скорость ветра 5 м/с; но если скорость ветра достигает 12 м/с, то скорость песка увеличивается втрое!

При любых ли скоростях ветра сохраняется рябь? Нет, сильный ветер рябь уничтожает. Он взметает в воздух все частицы песка на поверхности: и мелкие, и крупные. Мелкие валики песчаной ряби раздуваются, верхний слой песка как бы вспухает и теряет правильные очертания. Такое происходит во время песчаных бурь, когда скорость ветра превышает примерно 16 м/с.

Если скорость ветра меньше 16 м/с, но все же существенно превышает скорость, при которой возникает песчаная рябь, то появляются настоящие песчаные волны — крупные формы рельефа. Раньше думали, что для образования таких волн нужны пологие неровности почвы, замаскированные песком, а потом выяснилось, что они могут возникать и на совершенно ровном месте, лишь бы слой песка имел достаточную толщину, чтобы дать вдоволь материала для их образования.

Песчаные волны образуются примерно по той же схеме, что и рябь. Но теперь мелкие частицы, оторвавшись от поверхности, попадают в высокие слои воздушного течения, где турбулентные пульсации скорости потока гораздо крупнее. С поверхности отрываются и более крупные частицы. Упав на песок из потока, они образуют на нем полосы шириной в 1—2 м, сложенные главным образом из крупных частиц. Никакой ряби на них практически нет, поскольку ветер имеет скорость 13—16 м/с. Такие ветры в пустынях дуют примерно 1% всего времени, так что полосы

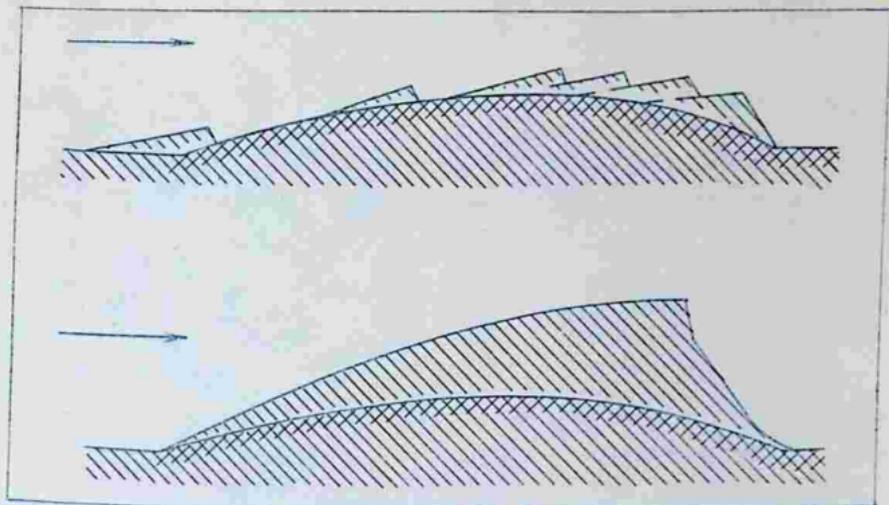


Рис. 57. Динамика развития гребня песчаной волны

развиться в крупные волны, конечно, не могут. Периодичность полос соответствует периодичности крупномасштабных пульсаций скорости ветра и может достигать даже 100—200 м. Песчаные полосы — это зачатки крупных волн, наподобие того как мелкие валики были зачатками волн песчаной ряби.

Полосы становятся своеобразными рубежами для частиц, переносимых более медленными ветрами, имеющими скорость примерно от 8 до 12 м/с и дующими примерно 10—12% полного времени. Высота полос составляет 20—25 см, то есть наветренный их склон при ширине полосы, скажем, 2 м образует с горизонтальной поверхностью значительный угол. Неизбежно с подветренной стороны полосы появляется присоединенный вихрь; для его появления, как мы говорили, достаточно, чтобы угол превышал всего лишь 6° .

Полоса начинает расти вверх сразу с двух сторон: с подветренной стороны песок к гребню сгоняет вихрь, с наветренной — медленно ползущие по склону вверх волны ряби, которые доходят до гребня и ссыпаются по крутому откосу в ложбину (рис. 57). Сам гребень образует уже достаточную тень, из ее зоны песок не выносятся, а с помощью присоединенного вихря идет на укрепление гребня. Вместе с тем рост крутизны гребня замедляет подъем волн ряби, и они возле гребня, совсем как волны на мелководье, сближаются.

Рост песчаных волн в высоту идет, когда дует ветер со скоростью 4—8 м/с, а на такой ветер падает 85—90% всего времени. Если ветер слаб, то песок не может взобраться на наветренный склон и остается у его подножия. В целом пологий склон гребня может иметь сложную форму и сложное распределение частиц



Рис. 58. Песчаные барханы

песка по крупности. Здесь все зависит от того, какие ветры работали над песчинками.

Так растет бархан. Чем он длиннее и выше, чем больше песка в нем, тем он устойчивее. В отличие от эфемерной песчаной ряби барханы живут многие годы. Ветер уже не может разрушить бархан, но он может изменить его первоначальную форму.

Полосы ряби тянутся строго перпендикулярно направлению ветра, который создал их, и обычно имеют длинные фронты, почти смыкающиеся друг с другом. Это означает, что строение фронта в приземном потоке ветра довольно однородное, отдельные струи воздуха по фронту ветра почти не опережают друг друга. Сама поверхность песка как бы упорядочивает ветер.

Песчаные волны образуются более высокими участками фронта ветра, где такой сплошности струй воздуха обычно нет, поэтому барханы возникают разрывной цепочкой. За долгую их жизнь дуют ветры разных направлений, но, конечно, для данной местности есть господствующее направление ветра. Обтекая барханы, ветры постепенно разворачивают их в господствующем направлении, снося частицы песка по их бокам, и придают наветренным склонам (в плане) округлую форму.

Мало того, ветер использует малейшие неровности, углубления на гребне бархана, выдувая из них песок сначала в ложбину, а затем «прорывает» в самой ложбине отлогий канал. И вот уже бархан принял своеобразную полулунную форму рогалика. Фотография такого бархана приведена на рис. 58. Барханы отличаются от волн ряби еще и тем, что их гребни сложены из мелких частиц, а крупные песчинки покоятся на дне бархана.

Песок — не единственное сыпучее вещество, известное человеку в природе. Не менее известен ему и снег. Правда, в отличие от песка снег — довольно неустойчивое состояние вещества. Он может растаять, может превратиться в лед, наконец, на снегу при его расплавлении и последующем замерзании может образоваться ледяная корка. Форма снежинок разнообразна — от красивых шестиугольных кристалликов, лучи которых напоминают ветвистые стволы деревьев, до круглых гранул, похожих на песчинки. Когда снежинки имеют форму гранул, ветер образует из них волны, аналогичные песчаным. Фотографии снежной ряби приведены на рис. 59.

Между ними видна отчетливая разница. В одном случае это



Рис. 59. Волновая рябь: а — на старом и б — на свежесыпавшем снегу

снежная рябь с длинными фронтами, очень похожая на ту, что приводилась на фотографии рис. 54; в другом — снежная рябь внешне близка тем песчаным волнам, которые довольно редко образуются ветром, но зато вполне обычны на подводном песке (о них разговор впереди). Второй вид снежной ряби поражает удивительно правильным «шахматным» расположением гребней и впадин узких волночек с изогнутыми коротенькими фронтами. Иными словами, в таких волнах, кроме продольной периодичности, то есть регулярного расположения их вдоль потока воздуха (или воды), наблюдается еще и поперечная периодичность.

Происхождение поперечной периодичности связано с тем фактом (он был открыт в конце прошлого века норвежским ученым Бьеркнесом), что любые два тела, увлекаемые потоком жидкости или газа, могут взаимодействовать друг с другом. Конечно, такое взаимодействие возникает как результат сложной картины сил в потоке, который несет и обтекает тела. Оно имеет чаще притягивающий характер.

Обычно силы взаимодействия довольно малы, но иногда могут стать и значительными. Простейшим примером действия таких сил может служить притяжение двух кораблей, следующих в одну сторону параллельными курсами. Движение кораблей передается воде, и если корабли идут близко друг к другу, то в него вовлекается весь разделяющий корабли слой жидкости. Давление в нем по закону Бернулли становится меньше, чем в воде по наружным бортам кораблей, и возникает сила, стремящаяся сблизить оба корабля. Если не принять специальных мер, то корабли могут даже столкнуться, демонстрируя тем самым, по шутливому замечанию одного моряка, что параллельные линии сходятся вовсе не в бесконечности.

Пока снежинки лежат на поверхности снега и их обтекает ветер, сила трения между ними, конечно, намного больше, чем сила притяжения, действующая на них со стороны воздушного потока. Но когда они поднимаются в воздух, возникает очень сложное взаимодействие между ними и потоком. На рис. 58 мы могли видеть, что в начале полета скорость частиц возрастает гораздо быстрее, чем спадает к концу полета, возникает своеобразная инерция частиц на действие ветра. В результате (доказать это можно математически) оказывается «выгодным» такое положение, чтобы место наибольшей концентрации частиц в одной струйке воздуха приходилось примерно на место наименьшей концентрации частиц в другой струйке, то есть чтобы сгустки частиц в соседних струйках летели с определенным сдвигом по фазе относительно друг друга. Сдвиг по фазе сохраняется и при оседании частиц на поверхность, так что гребень одной волночки приходится иногда почти точно на ложбину другой. Такое примерное объяснение имеет поперечная периодичность («шахматная» структура) снежной ряби.

Остается лишь добавить, что силы, ответственные за возникновение поперечной периодичности, намного меньше сил, соз-

дающих основную, фронтальную рябь. Поэтому «шахматная» структура образуется очень медленно, под влиянием длительно-го, устойчивого ветра, дующего в одном направлении. Такое же происхождение приписывается и поперечной периодичности подводной песчаной ряби (русловых рифелей, рис. 60), с той лишь разницей, что тут место ветра занимает придонное течение воды. Ясно, что подводная песчаная рябь с поперечной периодичностью может возникнуть только на достаточно глубоком дне, где почти не ощущается воздействие волн.

В сущности, в возникновении волн от «равномерного» и волнообразного течения воздуха или воды довольно много общего. Периодические пульсации скорости и давления в турбулентном потоке нужны только на начальном этапе образования волн.

Как только возникли заметные неоднородности рельефа поверхности, поток тут же начинает их ощущать. Над возвышением рельефа толщина потока сужается и скорость его возрастает, в этой области потока давление становится меньше. Это позволяет частицам легче перебираться на гребни, а оттуда ссыпаться за гребень. С подветренной стороны гребня довольно рано возникает присоединенный вихрь, который сдвигает частицы к гребню, подпирает его, в результате чего гребень приобретает устойчивость и начинает спокойно расти в высоту. Асимметрия песчаных и снежных волн — пологий наветренный и крутой подветренный склоны — является всеобщей характеристикой таких волн.

Если же поверхность сыпучего вещества «пассивно» отражает волны в потоке над нею, то песчаные волны должны быть гораздо более симметричными. Так на самом деле и бывает. Пусть, например, на песчаном дне возле берега образовалась стоячая волна. Это может произойти, когда вода по отношению к волнам не слишком мелкая, так что может дойти до препятствия на берегу (например, волноотбойной стенки), не разрушившись. Отражившись от препятствия и сложившись с набегающей волной, она создаст стоячую волну.

Распределение линий тока в стоячей волне нам уже знакомо (см. рис. 8). Частицы имеют наибольшую скорость горизонтального движения в узлах волны и наименьшую — в пучностях. Эти скорости довольно быстро убывают с глубиной, если мы имеем дело с волнами на глубокой воде. Но в шторм, когда возникают достаточно длинные волны, море глубиной даже в 200 м может оказаться для них мелководным. Поскольку на мелкой воде амплитуда горизонтальных колебаний частиц в волне не убывает с удалением от поверхности, они и на такой глубине могут поднимать песок со дна и взмучивать воду.

Поднятые в воде под узлами стоячей волны песчинки переносятся в места пучностей волны, где и откладываются. В итоге образуется своеобразная песчаная копия стоячей волны. Подобные копии возникнут также, если создать стоячие звуковые волны в горизонтальной трубке. Ими много занимался век

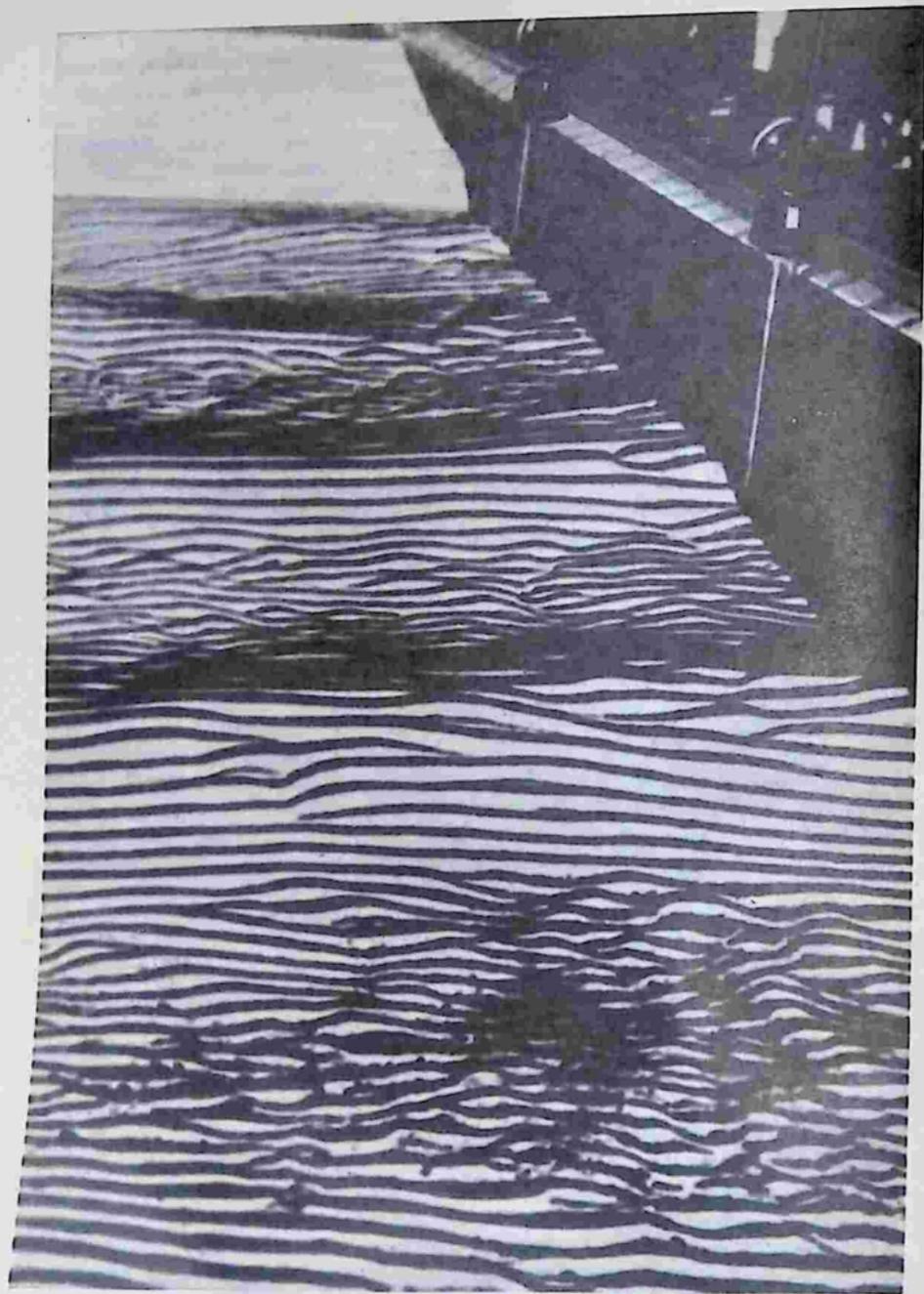


Рис. 60. Русловые рифели

назад немецкий физик А. Кундт, и в честь него они получили название кундтовых, или пылевых фигур. (Кундт брал для своих опытов чрезвычайно мелкозернистую фракцию песка — ту, что и называется пылью.)

Если по поверхности мелкой воды распространяется бегущая волна, то аналогичная волна может бежать и по песчаному дну, поскольку в такой волне частицы, колеблясь по сильно вытянутым эллипсам, имеют большие горизонтальные скорости.

Конечно, донные песчаные копии волн на воде имеют значительно меньшую высоту, чем оригиналы, но длины обеих волн должны совпадать.

Взаимодействие частиц воды и донного песка предельно однозначно, поскольку песчинки ведут себя совершенно пассивно. Несколько иначе обстоит дело с песчинками на берегу, когда к нему приходят очень невысокие волны. Такие волны уже сами несут с собой мелкие частицы песка, доносят их до границы своего заплеска, где они и оседают, когда вода уходит в песок. Образующиеся при этом песчаные волны носят название фестонов. Обычные фестоны очень недолговечны: любая другая волна, достигшая границы заплеска предшествующей волны, стирает ее произведение и рисует свое.

Фестоны имеют форму полумесяца, обращенного вогнутой стороной к морю. Иногда они достигают внушительной длины и высоты, что возможно, лишь если над ними поработала не одна, а множество волн.

Гипотезы образования фестонов насчитываются сегодня десятками, но ни одна из них не дает полного объяснения. В общем, понятно то, что, когда волна выходит на берег, она движется не только вперед, но и растекается по нему в стороны, пока энергия ее поступательного движения не иссякнет. После этого вода под действием силы тяжести скатывается в море. На границе заплеска она сначала уходит в песок. Вследствие каких-то мелких неровностей рельефа отдельные ручейки стекающей воды сливаются в более крупный поток, который может образовать русло на песке, как правило, примерно против средней линии фестона. Понятно, что русло будет оказывать влияние на движение фронта следующих волн, внося определенную «слаженность» в их действия.

Еще интереснее процесс образования песчаной ряби и песчаных волн у берегов. Посмотрите на рис. 61: фотография сделана, когда море при отливе далеко отступило от берега. Длина «волны» у такой ряби составляет около 5 см, и она не пассивное отражение ряби на воде, а результат очень активного взаимодействия водяных волн с песком. Это тоже рифели. Еще лучше взаимоотношение «длин волн» рифелей и водяных волн видно на рис. 62, где «белая» весьма синусоидальная волна в лотке создала очень правильный ряд «черных» рифелей на дне лотка. Видно, что на одной водяной волне укладываются добрых три десятка рифелей.

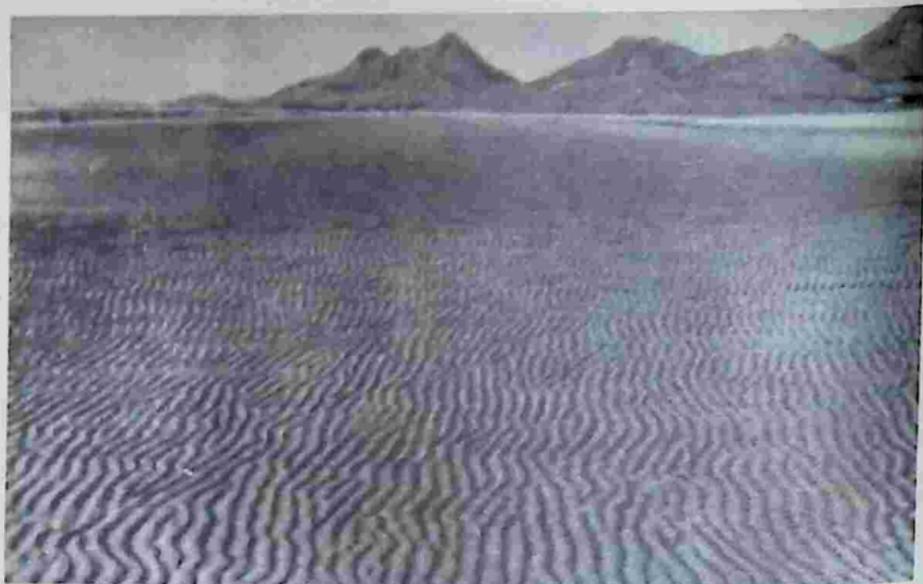


Рис. 61. Волновые рифели на морском дне в час отлива



Рис. 62. Рифели, созданные синусоидальной «водяной» волной

Очень детальные исследования возникновения рифелей были проведены советским ученым Б. А. Шуляком. В частности, он выяснил зависимость длины волны и высоты рифелей от периода водяных волн, скорости движения частиц в них (зависящей, в свою очередь, от длины водяных волн и глубины водоема), крупности частиц песка и ряда других факторов. Не вдаваясь в детали этих исследований, рассмотрим главное отличие рифелей, созданных волнами, от тех, что возникают вследствие придонного течения.

На первый взгляд волновые рифели вообще не должны существовать. Направления движения частиц воды под горбом волны противоположны тем, что совершают частицы воды под впадиной. Все, что создано волной за первую половину периода, должно, казалось бы, полностью стираться за вторую половину. Естественно, что когда мы рассматриваем безволновой поток, в котором частицы воды не совершают колебаний, этот вопрос не возникает.

Ответ на него, однако, сравнительно прост. Первый горб волны, встречаясь с достаточно гладкой поверхностью, на которой, впрочем, есть мелкие одиночные неровности — зародыши будущих рифелей, успевает слегка деформировать эту поверхность. Лобовое давление воды сдвигает песчинки к препятствию — барьерчику, и часть частиц остается около него. Первая впадина встречает уже не совсем гладкую поверхность. Конечно, она частично размывает то, что было создано движением воды под горбом, но именно лишь частично, ибо остается гораздо больше.

Следующие волны раз за разом укрупняют эту неровность, и вот появляются уже присоединенные вихри. Теперь передний по отношению к ходу волны склон рифеля нарастает за счет песчинок, приносимых поступательным движением воды, а задний — за счет песчинок, поставляемых вихрем. Но передний и задний склоны каждые полпериода меняются местами, и в результате гребень рифеля становится очень симметричным. Этого, конечно, не наблюдается на безволновом рифеле (см., например, рис. 60).

Кстати говоря, и вихрь теперь не может развиваться до сколько-нибудь крупного масштаба. Если в безволновом потоке он мог, по крайней мере в принципе, захватить всю толщу воды от поверхности до дна, то теперь он должен исчезнуть спустя полпериода волны, появиться на противоположном склоне рифеля и лишь потом снова развиться на старом месте. Поэтому и волновая рябь должна иметь меньшие размеры, чем в безволновом течении при такой же его скорости.

Понятно, что чем больше период волны, тем на большее расстояние поток успевает перенести песчинки и тем большее число их может быть поднято в воду. Поэтому и длина волны, и высота рифелей должны возрастать с ростом периода водяной волны. Это действительно наблюдается на опыте. Вместе с тем чем больше энергия волны, то есть ее высота, и чем ближе дно к поверхности воды, тем больше скорость движения частиц в придонном слое воды.

Эта скорость пульсирует, каждые полпериода меняя свое направление. Пока она мала, песчинки не поднимаются в воду. Кстати, в воде частицы кварцевого песка весят на одну треть меньше, чем в воздухе, поскольку их плотность около 3 г/см^3 . Поэтому они легче отрываются от дна в воде, чем в воздухе, и дальше «планируют» в потоке. Затем скорость нарастает, час-

тицы отрываются от дна и переносятся на расстояние тем большее, чем больше скорость воды в среднем. Поэтому длина волны рифелей растет с увеличением высоты водяных волн и приближением дна к поверхности.

Растет и высота рифелей, но до определенного предела. Если скорость воды становится очень большой, с рифелями происходит то же, что с песчаной ветровой рябью во время сильного ветра, — они исчезают. Интенсивное движение воды у дна заставляет вспухать весь поверхностный слой песка, песчинкам уже невозможно закрепиться. Прямое и обратное движения воды у дна полностью уничтожают работу друг друга. Именно поэтому, а вовсе не из-за нерегулярности штормовых волн рифели в условиях высоких волн на мелководье исчезают.

При определенных условиях могут образовываться уже не рифели, а крупные песчаные волны, аналогичные песчаным волнам, о которых мы говорили несколько раньше, разбирая вопрос о взаимодействии сыпучих песков и ветра. Причиной их образования некоторые исследователи считают стоячие водяные волны, которые образуются на очень отмелых берегах в результате интерференции волн на поверхности и в донном противотечении. Такие песчаные волны в отличие от рифелей очень пологи — длина их волны может достигать до нескольких десятков метров, а высота — до полуметра.

НЕОБЫЧНЫЕ ВОЛНЫ

Дума за думой, волна за волной —
Два проявления стихии одной:
В сердце ли тесном, в безбрежном ли море,
Здесь — в заключении, там на просторе.
Ф. Тютчев

Волны на поверхности воды, которым посвящена основная часть этой книги, представляют собой каждодневно наблюдаемое и в этом смысле обычное для нас явление. Из школьного курса физики мы получаем понятие о невидимых непосредственно глазом звуковых и электромагнитных волнах. (Конечно, электромагнитные световые волны мы воспринимаем и непосредственно зрением, но не как волны, а как потоки световых частиц — фотонов. По этой причине само представление об электромагнитных волнах возникло лишь век назад.) И эти волны сегодня в нашем понимании тоже стали обычными. Пожалуй, обычными для многих можно назвать также волны на песке или на снегу, хотя мы отдаем себе отчет в том, что это «не совсем» волны.

Какой же смысл здесь вкладывается в понятие необычных волн? Можно сказать так: эти волны еще не стали обычными даже для самих физиков. Не то чтобы их обнаружили только вчера, некоторые из них уже известны ученым многие десятилетия, но вот то, что относиться к соответствующим явлениям следует как к волнам, исследователи поняли лишь недавно.

Это не случайно: явления, о которых пойдет речь, лежат в большинстве своем вне сферы физики. Перечислим те из них, о которых дальше пойдет речь: волны в потоках транспорта, волны в химических реакциях, волны в биологических процессах, в частности в работе сердца и нервной системы, волны в популяциях — сообществах биологических организмов, волны в звездных системах — галактиках. Образно выражаясь, волны словно разбежались из физики и охватили чуть ли не все пространство процессов в неживой и живой природе.

Конечно, для физиков и для их коллег в других областях науки этот «волновой прибой» был неожиданным. Еще большей неожиданностью оказалось то, что математически все эти волны схожи, то есть могут быть описаны одними и теми же уравнениями (только, разумеется, входящие в них величины имеют различный смысл).

Уж на что физики привыкли к тому, что совершенно разные физические явления подчас описываются одинаковыми уравнениями (например, распространение теплоты по куску металла и распространение запаха от флакона одеколона по комнате или, скажем, отражение света от зеркала и вылет альфа-частиц из

атомных ядер). Но эти явления находятся в лоне самой физики, и совпадение уравнений для них происходит только при соответствующем выборе моделей явлений.

Совпадение же вида уравнений, описывающих, например, колебания маятника и численности некоего вида животных, не только ошеломило ученых, но и заставило их придирчиво выяснять, насколько правильны придуманные ими математические модели этих явлений. Одни модели в самых существенных чертах нередко оказывались верными, другие приходилось подправлять, а то и вовсе отбрасывать, заменяя новыми, чтобы добиться лучшего согласия с результатами практических наблюдений и экспериментов.

Но само наличие сходства математических моделей говорит о существовании немногих глубоких общих принципов, пригодных, видимо, «на все случаи жизни». Естественно, что эти принципы имеют столь же широкую общность, как, скажем, закон сохранения энергии. Их стоит вкратце описать.

Первый принцип — это возможность представить систему, в которой наблюдаются волновые явления, в виде сплошной среды. В отношении волн на воде или в сыпучих средах мы уже видели, как это делается: вводится понятие об элементах среды, которые считаются совершенно одинаковыми.

Любой элемент среды, как всякий вещественный объект, состоит из атомов и молекул. Не желая рассматривать явление на этом уровне, мы приходим к естественному требованию: элемент среды должен насчитывать в своем составе очень много атомов или молекул, так что его размеры должны значительно превосходить атомные масштабы. Тогда все элементы окажутся статистически одинаковыми. Если размеры каждого элемента, в свою очередь, будут намного меньше размеров всей среды, то в ней окажется очень много элементов. И теперь опять же можно будет не следить за движением какого-либо одного элемента, а давать описание коллективному их движению, например волновому движению или другим процессам в среде.

Если изучаются волны в среде, то лучше говорить не о размерах среды, а о характерных размерах волн, скажем, их длине. Наименьшие длины волн на воде, которые представляют интерес для изучения (и рассматривались выше), измеряются сантиметрами. В свою очередь, молекула воды имеет размеры порядка 10^{-8} см. Если для размера элемента, или «частицы», воды принять геометрическое среднее из этих двух размеров, то он составит примерно 10^{-4} см (1 мкм).

Именно такие размеры имеют частицы красящего вещества, которое добавляют в воду, чтобы сделать видимым коллективное движение частиц воды, например, при распространении волны по ее поверхности. В частице краски — триллионы молекул, в объеме, отвечающем длине волны, умещаются триллионы частиц. Этого вполне достаточно для статистически усредненного описания волн в среде.

Следующий общий принцип: в среде должно передаваться движение от одних частиц к смежным частицам. В волнах на воде это движение передается благодаря практической несжимаемости жидкости, именно поэтому волна и бежит от места своего возникновения.

Этот принцип очень важен. Вспомним, что происходит при образовании песчаных волн. Согласно первому принципу песок можно считать сплошной средой, на самом же деле таким физическим свойством, как сплошность, он не обладает, и потому в нем нет переноса энергии от одной песчинки к другой. Нет в песке «активных волн», а стало быть, и групповой скорости. Вместо нее пришлось с натажкой использовать лишь фазовую скорость, связывая ее с действительно активными движениями потоков воздуха или воды, вызывающими образование «пассивных волн» на песке или на снегу.

В среде может передаваться не только движение, но и информация о положении или состоянии смежных частиц. Для «неживой» природы эта информация заключена в энергиях и импульсах частиц: именно поток энергии обеспечивает распространение волн на воде и в других «неживых» средах, будучи, так сказать, автоматическим условием существования волн. В «живых» системах, однако, лучше говорить об информации, а не об энергии. Например, транспортный поток можно рассматривать как движение сплошной среды, где отдельными элементами служат экипажи. Обмен информацией о положении элементов осуществляется с помощью сигналов, воспринимаемых зрением и слухом водителей. Конечно, энергия, заключенная в сигналах, слишком мала, чтобы непосредственно воздействовать на положение и движение экипажей. Но эта энергия, пройдя целую цепочку превращений, «запускает» гораздо более мощные источники энергии и в конце концов регулирует движение экипажа.

Сядем в вертолет и достаточно высоко поднимемся над шоссе с напряженным движением, чтобы не очень четко различать отдельные автомобили. С такой «точки зрения» слабо ощутимы отдельные нерегулярности движения — то, что транспортный поток состоит из различных экипажей: легковых автомашин, грузовиков, мотоциклов и т. п.; что они движутся со слегка различными скоростями; что между ними существуют разрывы разной протяженности. Игнорируя эти различия, мы как раз и вводим средний элемент транспортной среды. Это не такая уж большая идеализация, то есть отступление от действительности. Вспомним, что линейные волны мы часто изображаем в виде синусоид, хотя даже мелкие волны ряби никогда идеально не повторяют друг друга. Если суммировать результаты наших вертолетных наблюдений за какой-то промежуток времени, то вполне отчетливо выявятся общие закономерности. Естественно, что само наблюдение должно одновременно охватывать достаточное число машин. По условию размеры каждого элемента должны быть намного меньше размеров среды.

Источником транспортных волн обычно служит какое-либо препятствие на дороге, например неисправная машина или, что обычно для городских условий, светофор. Вот где-то в конце правого поля нашего обзора зажегся красный светофор. Автомобили, до той поры следовавшие друг за другом с равными интервалами, начали тормозить, останавливаясь ближе друг к другу, чем во время движения. Мы не видим, как они тормозят, мы улавливаем лишь, что вдоль потока транспорта влево побежала волна сжатия, сближения автомобилей. Через некоторое время светофор на правом конце переключился на зеленый свет, машины начали трогаться, и по их ряду влево побежала волна разрежения.

Эти качественные наблюдения можно превратить в несложные и вместе с тем практически важные количественные заключения. Ведь мы наблюдаем не что иное, как гидравлический удар в транспортном потоке, и возникающая волна сжатия есть ударная волна, ничем в принципе не отличающаяся от той, что бежит по водопроводной трубе при резком закрытии крана.

В полной аналогии с гидродинамикой можно ввести плотность транспортного потока ρ (число машин на единицу длины ряда движения) и расход $Q(\rho)$ (число машин, проходящих через некоторое сечение дороги в единицу времени). Обе величины связаны очевидным соотношением:

$$v = \frac{Q(\rho)}{\rho}, \quad (26)$$

где v — скорость движения машин. Сам расход зависит от плотности: он, разумеется, равен нулю, когда машин на дороге нет ($\rho = 0$), но он равен нулю также, когда машины стоят «впритирку» одна за другой ($\rho = \rho^*$ — ситуация дорожной «пробки»). Где-то между двумя этими значениями плотности ρ расход Q достигает максимального значения ($Q_{\text{макс}}$).

Наблюдения за автомобильным движением в США показали, что для однопольного движения характерны следующие средние показатели: $\rho^* \approx 140$ машин на 1 км дороги, $Q_{\text{макс}} \approx 1500$ машин в час и средняя плотность (отвечающая значению $Q_{\text{макс}}$) $\rho_{\text{макс}} \approx 50$ машин на 1 км дороги. Отсюда получается оптимальная (не наибольшая!) скорость движения $v_{\text{макс}} \approx 30$ км/ч. Тем, кто пользуется автомобилем на загруженных магистралях, такая оптимальная скорость не покажется слишком низкой!

Определим фазовую скорость распространения волны сжатия в транспортном потоке (о групповой скорости, как и относительно песчаных волн, здесь говорить не приходится). Очевидно, для наблюдаемой «волны плотности» автомашин она равна:

$$c_{\phi} = \frac{\Delta Q}{\Delta \rho} = v + \rho \frac{\Delta v}{\Delta \rho} \quad (27)$$

(второе равенство получается, если использовать формулу (26)).

Если ничто не вызывает необходимости изменить плотность потока, то не меняется и скорость его движения, $\Delta v = 0$ и $c_{\phi} = v$, то есть волны сжатия нет. Но нас больше интересует положение, когда загорается красный светофор и непосредственно перед ним становится $\rho = \rho^*$.

Обозначим длину автомашины l , а расстояние между передними бамперами следующих друг за другом машин — h , тогда «расстояние столкновения» будет равно $h - l$. Если среднее время реакции водителя (и автомашины на его действия, что всегда учитывает опытный водитель) равно t_p , то он выбирает безопасную скорость движения $v = (h - l)/t_p$. Но поскольку $h = 1/\rho$ и $l = 1/\rho^*$, то отсюда получаем

$$v(\rho) = \frac{l}{t_p} \left(\frac{\rho}{\rho^*} - 1 \right), \quad Q(\rho) = \frac{l}{t_p} (\rho^* - \rho)$$

и по формуле (27) находим интересующую нас фазовую скорость

$$c_{\phi} = - \frac{l}{t_p} . \quad (28)$$

Обратим внимание вот на что: эта скорость не зависит ни от каких внешних условий и определяется только свойствами самой транспортной среды, а именно средней длиной автомашины и средним временем реакции водителя. Такая «автономность» волн, независимость их от порождающих условий не раз встретится нам в дальнейшем.

Волна сжатия, естественно, распространяется против направления движения автомашин (знак минус в формуле (28)). Если принять длину автомашины в среднем равной 6 м, а время реакции 0,5 с, то мы получим $c_{\phi} \approx -43$ км/ч.

Этот расчет относится, конечно, к неблагоприятным условиям движения. В обычных условиях водители видят не только «затылок» идущей впереди машины, но и сигнал светофора еще издали и начинают снижать скорость заблаговременно. В результате переходной участок ударной волны от неподвижной к подвижной «среде» растягивается и даже может стать почти незаметным (слабая ударная волна). Но если движение происходит в густом тумане, когда водитель в лучшем случае видит лишь расплывчатый силуэт идущей перед ним машины, то «вредный характер» ударной волны может проявиться в полную силу. Достаточно головной машине в длинном их ряду налететь на какое-нибудь препятствие или просто остановиться, как ударная волна сжатия потока машин приобретает буквальное значение «волны ударов» машин друг в друга. Описаны случаи автокатастроф, в которых участвовали десятки машин.

Впрочем, хорошо известно, что виновником дорожного затора может стать даже исправно работающий светофор. В сущности, сам он является источником периодически возникающих ударных волн, резко рассекая сплошной транспортный поток на

отдельные порции. Пусть в некоторый момент на светофоре зажегся красный свет и по потоку побежала волна сжатия. Спустя какое-то время $t_{кр}$ красный сигнал погас и зажегся зеленый свет, так что по потоку побежала волна разрежения, «ликвидирующая» волну сжатия. Какой же должна быть продолжительность зеленого сигнала $t_{зел}$, чтобы эта «ликвидация» оказалась полной? Волновая теория транспортных потоков показывает, что оба времени связаны простым соотношением:

$$\frac{t_{кр}}{t_{зел}} \leq \frac{Q_{\max}}{Q(\bar{\rho})} - 1, \quad (29)$$

где $\bar{\rho}$ — среднее значение плотности потока машин. Если это условие не выполняется, то перед светофором возникает хронический затор.

Естественно, в разные времена года и даже суток значения $\bar{\rho}$ и $Q(\bar{\rho})$ не остаются постоянными. Но это не означает, что надо вернуться к ручному управлению светофорами (да и оно не всегда спасает на напряженных перекрестках). Светофоры могут работать и автоматически, но для оптимальной их работы приходится создавать специальные службы. Датчики, установленные под дорожным полотном, постоянно определяют значения $Q(\rho)$ на пересекающихся магистралях, вычислительные машины сами принимают решения о переключении светофоров. Подобные службы сегодня созданы во многих крупных городах с напряженными транспортными потоками.

На примере транспортного потока хорошо видно, с какой легкостью возникают волны в однородной автомобильной среде. Это даже кажется несколько удивительным. Многие повседневные наблюдения приучили нас к тому, что однородное состояние — это некий идеал, наиболее устойчивое состояние среды, к которому она стремится, а достигнув, нелегко покидает его. По этой причине, например, всегда наиболее вероятно хаотическое движение молекул в газе, энергия направленных, упорядоченных движений вещества стремится перейти в энергию неупорядоченных движений, то есть в тепловую энергию. Любые неоднородности — флуктуации в однородной среде стремятся рассосаться; чем крупнее флуктуации, чем дальше они уведут среду от однородного состояния, чем большие объемы среды они захватывают, тем менее они вероятны.

Это все так, но лишь до тех пор, пока среды или, более общо говоря, системы очень мало отклоняются от равновесия и сами отклонения происходят медленно. Когда же в системах идут процессы (например, химические, биологические или иные), которые сопровождаются обменом веществом и энергией с внешней по отношению к системе средой, положение радикальным образом меняется. Теперь устойчивыми могут оказываться и «гигантские флуктуации» — состояния системы, очень далекие от равновесия. В этом состоит еще один важный принцип — представление об открытой диссипативной системе.

Такое название получили системы, в которые постоянно или время от времени поступают и из которых уходят вещество и энергия. Поступающие вещество и энергия расходуются на протекание различных процессов в системе, на выработку новых веществ и новых форм энергии.

Процессы превращения вещества и энергии в самом общем виде изучает термодинамика. Она начала с исследования процессов, происходящих в замкнутых системах, наглухо отгороженных от внешнего мира. Такие системы, конечно, в большой мере являются идеализацией, но они легче поддавались изучению на первых порах, и на этом пути были достигнуты крупные успехи.

Термодинамика замкнутых систем базируется на двух основных законах. Один из них — закон сохранения энергии: ни в одном процессе или явлении количество участвующей в нем энергии не может измениться ни на йоту, сколько ее было в начале, столько же будет в конце процесса. Второй можно было бы назвать законом обесценения энергии: количество тепловой энергии в конце процесса в лучшем случае должно остаться тем же, что и в его начале (так называемый обратимый процесс), а в худшем — должно возрасти (необратимый процесс).

Прилагательные «лучший» и «худший» классическая термодинамика равновесных процессов вполне обосновывает: по-видимому, подавляющее большинство процессов в мире вещественных тел происходит необратимо, и из второго закона следует, что количество тепловой энергии, или, иными словами, «количество хаоса», в мире должно возрастать со временем. В конце концов вся энергия должна была бы перейти в форму теплоты, из которой уже нельзя получить никакого организованного, упорядоченного движения. Наступила бы «тепловая смерть» мира.

Эту сугубо пессимистическую, но, повторяем, обоснованную вторым законом термодинамики мысль высказал век назад немецкий физик Р. Клаузиус. Естественно, конкретных сроков наступления «тепловой смерти» он назвать не мог, но и без того пророчество выглядело довольно устрашающим. Правда, реальный мир как будто бы не спешил подтверждать его в полной мере: мир существовал уже миллиарды лет, не только не угасая, но и создавая все более совершенные образцы упорядоченности, организации. Пример последнего — Земля. Началась она со сравнительно однородного газопылевого облака, а спустя 5 млрд. лет природа создала на ней такие предельно далекие от хаоса образцы, как человеческий организм и даже (хотя о его совершенстве можно говорить лишь с определенными оговорками!) человеческое мышление.

Противоречие между предсказаниями, вытекающими из второго закона термодинамики, и «практикой» природы было настолько очевидным, что возникла естественная мысль об ограниченности рамок действия этого закона. (О неправильности его говорить нельзя, поскольку вся «малая практика» человеческой деятельности в сфере техники подтверждает его.) Эти рамки пыта-

лись установить на уровне отдельных систем частиц и тел, утверждая, что к Вселенной в целом второй закон не относится. И лишь после появления термодинамики открытых систем стало ясно, где искать пределы его применимости.

В далеких от равновесия процессах, в которых система интенсивно обменивается веществом и энергией с окружающей средой, энергия, действительно, диссипирует, то есть преимущественно переходит в тепловую форму. Но зато в этих процессах может рождаться более высоко организованное вещество, так что в определенной части открытой системы «хаоса» может в конце процесса оказаться меньше, чем в его начале.

Важно отметить, что процессы рождения более высокой организации вещества из первоначально менее упорядоченного, а то и вовсе неупорядоченного состояния часто носят колебательный характер и сопровождаются распространением волн.

Рассмотрим, например, химические реакции. Разговор о химических волнах важно начать с самой очевидной химической реакции — горения, в которой степень беспорядка часто лишь возрастает. Достаточно представить себе пожар, когда в конечном итоге какое-либо строение превращается в кучку золы и облако горячих газов. (Но тут же напомним: существует и другой распространенный процесс окисления, называемый дыханием. Он играет важнейшую роль при построении и функционировании сложно организованных живых систем.)

Реакция горения может зародиться в какой-то одной точке однородной среды, где в некий момент случайно или намеренно создалась неоднородность, например повышенная температура. Само горение с точки зрения равновесной термодинамики есть парадокс: возникшая неоднородность, флуктуация должна исчезнуть, рассосаться. В том-то, однако, и дело, что среда вовсе не равновесна, она находится, как говорят физики, в активном, ждущем, «взведенном» состоянии. Достаточно бросить спичку, как пойдет саморазгоняющаяся реакция, охватывающая постепенно все то, что может гореть, от очага побежит фронт пламени. Он и есть, в сущности, химическая волна.

Если процесс горения характеризуется малой интенсивностью, то фронт пламени будет иметь свойства слабой ударной волны, при большой интенсивности может вообще произойти взрыв, то есть возникнет очень сильная ударная волна. Важно, что в описываемом процессе за фронтом пламени образуется выжженная зона, не способная к дальнейшему горению. Именно поэтому, встречаясь, две ударные волны от двух взрывов или пожаров гасят друг друга. Таким обстоятельством пользуются для тушения лесных или степных пожаров, устраивая встречные пожары. В силу этого, несмотря на свою «уединенность», волны горения не могут быть солитонами: те во встречном движении просто проходят сквозь друг друга, не разрушаясь.

Но можно устроить и более «интересный» пожар. Для этого в зону пожара нужно подбавлять время от времени новое горю-

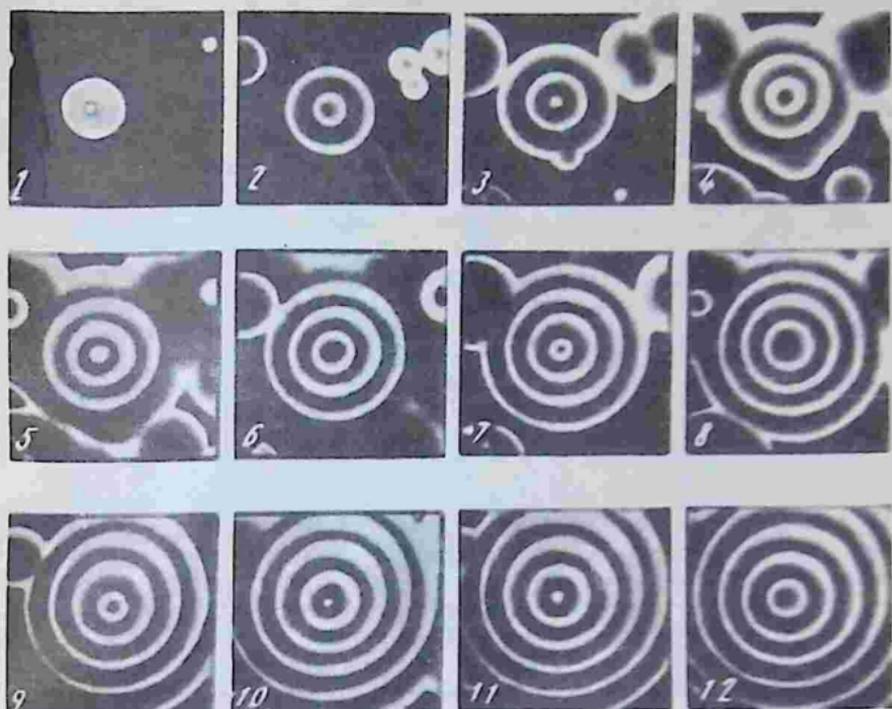


Рис. 63. Химические волны и возникновение будущего центра

чее и удалять продукты реакции. В природе (да и в технике) добавление новых порций горючего часто осуществляется путем диффузии. В результате среда после прохождения по ней фронта пламени постепенно снова приходит в состояние готовности к новому пожару. Его можно представлять себе как пожар на лугу, в центре которого горит свеча. После того как первая трава сгорела, она начинает расти снова, и через некоторое время по свежей траве снова бежит волна горения. Если трава после пожара отрастает быстро, то волны горения от свечи будут бежать часто.

Такое представление, конечно, «работает» не только при описании пожара, оно дает основу для объяснения химических волн, возникающих в целом ряде химических реакций. Одну из наиболее интересных реакций такого рода открыли и глубоко исследовали советские ученые, лауреаты Ленинской премии Б. П. Белоусов, А. М. Жаботинский и их сотрудники. Реакция эта довольно сложная, и мы не будем ее описывать. Отметим лишь, что она наблюдалась в сравнительно тонком слое вещества, так что возникающие волны были практически кольцевыми, двухмерными (рис. 63). Точками, из которых расходились волны, были некие маленькие неоднородности в достаточно однородной

реагирующей среде. Такие неоднородности всегда существуют даже в тщательно очищенных средах, ими могут быть и флуктуации.

Наблюдения выявили очень интересную особенность реакции. Между центрами зарождения химических волн возникает борьба за право диктовать свои условия всей системе. Побеждает тот центр, возле которого условия наиболее благоприятны для возникновения и распространения волн, и поэтому он может «испускать» их с наибольшей частотой. В конкурентной борьбе такой центр «поедает» своих соперников и становится ведущим, или, как его еще называют, водителем ритма.

Разумеется, столь анималистическое описание конкуренции центров зарождения химических волн преследует лишь цель наглядности. На самом деле конечный результат есть итог сложного взаимодействия самих волн. Уже из одного облика волн видно, что они — не синусоиды, не линейные волны, отличительной чертой которых является, как мы уже говорили, взаимная независимость.

Для нелинейных волн, например, характерны процессы их взаимодействия, в которых волны могут трансформироваться до неузнаваемости. Например, две нелинейные волны, встретившись, могут исчезнуть, дав начало третьей волне, частота которой равна сумме или разности частот сложившихся волн. Встреча волн с близкими частотами приведет к тому, что одна из них может «затянуть», подчинить себе другую, заставить ее изменить свою частоту. Это явление называется самосинхронизацией волн.

Вследствие такого нелинейного взаимодействия, совершенно не похожего на сложение линейных волн, по истечении некоторого времени в среде может остаться лишь несколько разных видов волн, а то и вовсе одна «выжившая» волна. Источником ее и становится ведущий центр.

Пример возникновения ведущего центра демонстрирует зародыш животного, когда у него формируется сердце. В разных местах пока еще бездействующей системы клеток, которой предназначена роль сердечной мышцы, самопроизвольно возникают волны в ходе биохимических реакций. Эти волны имеют в значительной мере случайный характер, но поскольку они нелинейны, в результате взаимодействия происходит их синхронизация. Отдельные участки клеточного скопления начинают колебаться согласованно и, естественно, получают преимущество перед областями, в которых колебания происходят хаотически: согласованные колебания требуют меньших затрат энергии, они более «выгодны», а потому и более устойчивы. Постепенно подчиняя себе колебания в других участках сердечной мышцы, эти области в конце концов заставляют всю мышцу сокращаться и расслабляться в едином ритме. Так возникает ритмоводитель сердца, иначе называемый синусовым узлом. (Мы уже догадываемся, что такое название сугубо неточное: никаких синусоидальных, линейных колебаний сердце не совершает.)

Конечно, такое описание — не более чем общий набросок, за его рамками остались все тонкие и важнейшие детали деятельности сердца и сам механизм биохимического управления работой сердечной мышцы. Многие из деталей остаются неизвестными и поныне. Но и того, что сказано, может быть достаточно для построения пусть еще и не совершенных математических моделей сердечной деятельности.

Модели представляют сердце как автоколебательную систему. Простейшей системой такого рода является обычный маятник часов. Известно, что он совершает незатухающие колебания и в отсутствие внешней силы, которая вынуждала бы его делать такое движение. Маятник сам «черпает» энергию на поддержание своего движения из ее источников — сжатой пружины или подвешенной гири, причем в таком количестве, которое как раз покрывает затраты на ее трение в течение периода колебаний. В разработку теории автоколебательных систем внесли вклад многие ученые, но среди них надо отметить советского физика А. А. Андропова. Он заложил ее фундамент и получил очень важные результаты, используемые в изучении тех автоколебательных систем, о которых мы здесь рассказываем.

Важным, но в общем не принципиальным отличием, скажем, сердечной мышцы от маятника или, точнее, системы связанных пружинок маятников, является то, что маятники — это как бы отдельные точки, или, как говорят физики, элементы системы с сосредоточенными параметрами. В сердце же, как и в других однородных скоплениях клеток, в «сплошных средах», выделить отдельные точки невозможно, о подобных средах говорят как о системах с распределенными параметрами. Согласованные колебания в них носят характер распространения волн. Чтобы подчеркнуть особое поведение этих волн, то обстоятельство, что их характеристики определяются главным образом свойствами среды, в которой они возникают и распространяются, видный советский физик Р. В. Хохлов предложил называть их автоволнами.

И действительно, они выглядят весьма автономными, мало зависящими от тех внешних условий, которые их порождают. В сущности, как мы уже говорили, их возникновение (равно как и исчезновение) — часто дело случая, некое отклонение от однородного состояния системы. Но, еще раз подчеркнем, не любой системы, а именно системы неравновесной, «взведенной», готовой принять участие в сложной игре отдельных нелинейных волн, их конкуренции и кооперации, в результате чего выживают лишь отдельные их виды, подчиняющие себе всю среду, в которой они распространяются.

Важный случай автоволн — это так называемые спиральные волны, или ревербераторы. Вспомним картину пожара на лугу. Мы считали, что после пожара трава на лугу везде подрастает с одинаковой скоростью и потому вторая волна горения распространяется так же, как первая. Но представим себе, что на каком-либо участке луга трава подрастает медленнее, чем на соседнем,

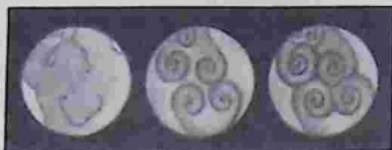


Рис. 64. Возникновение спиральных химических волн при разрыве фронта волны

или вообще не выросла. Тогда, дойдя до этого участка, фронт волны горения встретит (для определенности — слева) уже созревшую траву, а справа — голый участок.

Возникает разрыв фронта волны. Казалось бы, и разорванный фронт должен как ни в чем не бывало бежать вперед по созревшему участку, игнорируя несозревший, а миновав его, вновь восстановиться. Однако нет: фронт волны в точке его разрыва начинает как бы преломляться, поворачивать (это несколько похоже на рефракцию линейных волн при переходе из одной среды в другую, о которой мы рассказывали ранее). Поворачивая в точке разрыва, фронт накручивается на эту точку, образуя архимедову спираль (рис. 64). Если среда достаточно медленно приходит в состояние готовности к прохождению волн, спираль успевает совершить несколько оборотов.

Разумеется, согласованная картина распространения волны в среде в этом случае нарушается. Многие ученые считают, что именно такую природу имеют аритмии сердца, в том числе и наиболее опасная из них — фибрилляция, когда отдельные волокна сердечной мышцы, потеряв управление синусового узла, сокращаются вразнобой и сердце перестает качать кровь. Причины фибрилляции, вероятно, могут быть различными. Одна из распространенных — инфаркт, для которого характерно резкое изменение характера и интенсивности биохимических реакций в пораженном участке сердечной мышцы. На границах такого участка и могут с большой вероятностью возникать ревербераторы, которые приостанавливают распространение волны из синусового узла и ввергают сердце в тот «первобытный хаос», в котором оно находилось в начале своего развития в зародыше.

Несколько уточним сказанное. Распространяющиеся в клетках сердечной мышцы биохимические волны, конечно, не автономны в том смысле, что их возникновение регулирует нервная система. Распространение собственно химической волны — процесс медленный, природа во много раз убыстряет его с помощью специального механизма управления органами — нервной системы. Импульс по нервам распространяется намного быстрее, чем биохимическая волна в каком-либо органе. Синусовый узел диктует свой ритм сердечной мышце, посылая именно нервные импульсы во все ее участки.

Как же происходит распространение электрического импульса вдоль нервного волокна? Совершенно иначе, чем распространение электрического тока по проводам. Этот импульс — тоже химическая, а точнее электрохимическая волна: в ней участвуют,

наряду с молекулами химических соединений, и электрически заряженные ионы. Поэтому представления о химических волнах в последние десятилетия нашли приложения и к проблеме распространения нервных импульсов.

Нервное волокно похоже на электрический кабель, но отличается от него сложностью строения и происходящих в нем процессов не меньше, чем распространение импульса по нерву от движения электрического тока в проводнике. И хотя мы рассматриваем распространение волн на «уровне» сплошной среды, нам все же придется затронуть и молекулярный «уровень».

Восхищаясь единством математического описания таких несхожих явлений, как распространение импульса по нерву и, скажем, распространение пламени по пороховому шнуру (но не забывая, что за этим единством описания стоит замечательное единство природы!), тем не менее следует понимать, что увлекательность физики состоит именно в отыскании различий в этом единстве. Именно молекулярные и атомные характеристики определяют само различие сплошных сред.

Различие между нервом и пороховым шнуром действительно велико. Шнур действует как «двухсредная» система (порох внутри и воздух — поставщик кислорода для горения — снаружи). Нерв — это «трехсредная» система, состоящая из богатой ионами калия среды внутри нервного волокна, жировой оболочки — мембраны сложного химического строения — и богатой ионами натрия внешней среды, которую можно для простоты считать раствором поваренной соли (он так и называется физиологическим раствором). Такой баланс ионов натрия и калия (конечно, как мы уже понимаем, неравновесный) создается особым физиологическим механизмом в мембране, который называется натриевым насосом.

Уже из этого сугубо поверхностного описания ясно, что, даже пребывая в покое, то есть будучи в устойчивом состоянии, нерв далек от равновесия в термодинамическом смысле. Напротив, натриевый насос «накачивает» его во взведенное состояние, когда нерв готов к проведению импульса. В результате различной концентрации ионов в нерве и в окружающей плазме на мембране возникает небольшой отрицательный электрический потенциал — около 60 милливольт.

Пусть в нерв короткий импульс электрического тока. Если импульс мал, то потенциал лишь слегка качнется в положительную сторону и вернется к исходному значению. Но если импульс достаточно велик, то по нерву побежит «собственная» волна: ионы натрия хлынут внутрь нерва, а поток ионов калия — с некоторым отставанием наружу. Электрический потенциал спустя несколько тысячных долей секунды станет положительным, потом постепенно снизится до исходного значения, перейдет через него и затем окончательно вернется к исходному значению. На последней стадии в мембране работает уже калиевый насос: он изгоняет из нерва ионы натрия и всасывает обратно ионы калия.

Как именно устроены и работают молекулярные насосы в мембране нерва, до сих пор еще нет полной ясности. Ясно только, что нерв действует как автоколебательная система с распределенными параметрами: есть взведенная, «созревшая» среда, есть механизм распространения волны возбуждения (перенос ионов в обоих направлениях через мембрану), наконец, есть период восстановления свойств среды (период ее нечувствительности, рефрактерности благодаря инерционности восстановления исходного состояния). Все эти обстоятельства учитываются, когда строится математическая модель распространения нервного импульса. А определение электрических характеристик нерва — емкости, сопротивления, ионного тока и ряда других — позволяет провести математический расчет «до числа», которое уже можно сравнить с экспериментальными данными.

Конечно, все это вовсе не просто. Достаточно напомнить, что в нерве не возникает волна возбуждения, пока поданный на него импульс (неважно, естественного или искусственного происхождения) слишком мал. В этом отношении нерв принципиально отличается от электрического кабеля: распространение волн по нерву обладает некоторым порогом. Далее, как известно, нервные волокна неоднородны по своей длине, вдоль нерва на некотором расстоянии друг от друга располагаются сужения (так называемые перехваты Ранвье). Нервные волокна то разветвляются, то, напротив, соединяются по несколько друг с другом, а в мозгу вообще образуют сети невообразимой сложности.

Как ведут себя волны возбуждения в отдельных волокнах при встрече друг с другом и разбегании из одного в несколько волокон, как они гасят, усиливают и вообще трансформируют друг друга (не забудем, что это сугубо нелинейные волны)? Увидеть результат взаимодействия волн можно, скажем, на электроэнцефалограмме, но вот сколько-нибудь детально разобраться в этом мы сегодня еще не умеем. Пока здесь вся надежда на математический эксперимент, в котором мощные вычислительные машины решают уравнения распространения нервных импульсов в заданных условиях, лишь весьма отдаленно напоминающих сложные реальные условия.

И вот приходят новые идеи. Ученые, наблюдая поражения памяти, или, напротив, ее устойчивость даже при обширных повреждениях мозга, начинают подозревать, что память чем-то напоминает голограмму. Как в каждом, даже маленьком участке голограммы зафиксирована «память» о всей сцене, попавшей в поле зрения, так и память не сосредоточена в каком-то одном участке мозга, а, видимо, «рассеяна» по многим нервным его клеткам. Впрочем, лучше было бы говорить не о рассеянии, а, напротив, о едином согласованном, когерентном состоянии всех мозговых клеток.

И уже все меньше сомнений в том, что эта согласованная работа нервных клеток мозга есть след синхронизации тех автоколебаний, которые распространяются по нервным волокнам. Повто-

ряем, что ученые еще очень далеки от того, чтобы дать полную физико-химическую картину работы нервного волокна, не говоря уже об огромном агрегате этих волокон в мозгу. Но, может быть, они значительно ближе к построению такой математической модели распространения нервных импульсов, которая позволит смоделировать все основные особенности распространения и взаимодействия волн. Знание этих особенностей даст возможность понять, хотя бы в общих чертах, ни много ни мало как «нервную физиологию» мышления.

Построение подобной модели, конечно, чрезвычайно сложно не только с идейной, но и с чисто вычислительной стороны. В этом легко убедиться, вспомнив «задачу о светофоре» при регулировании транспортных потоков. Шоссе можно уподобить нервному волокну, первые реальные трудности возникают, когда надо отрегулировать оптимальным образом несколько потоков на пересекающихся магистралях, особенно если магистрали имеют разную ширину и состояние проезжей части, различную транспортную загрузку в отдельные периоды суток и времен года и т. д. А теперь представьте себе, что такую задачу приходится решать одновременно для многих сотен перекрестков в пределах крупного города! И все же решить ее куда проще, чем описать работу мозга с его триллионами нервных клеток и «транспортных магистралей» — нервных волокон.

Сам транспортный поток можно рассматривать не только как источник аналогии с нервным волокном. Он представляет собой среду, в которой распространяется особый тип волн. В отличие от химических, концентрационных волн этот тип называется волнами плотности и, конечно, напоминает еще звуковые волны, в которых происходят сжатие и разрежение среды и соответствующие изменения давления. Вместе с тем транспортные волны, разумеется, не полный аналог звуковым волнам: в них, например, под давлением можно понимать разве что «давление обстоятельств», главным из которых является четкое нежелание столкнуться с идущим впереди автомобилем.

Представление о волнах плотности позволило разрешить одну интригующую задачу. В отличие от транспортных потоков, она касается движения уже не в земных, а в галактических масштабах. В течение многих лет астрономы безуспешно пытались понять происхождение так называемых спиральных рукавов — красивой особенности облика многих наблюдаемых галактик. Вид спиральных галактик наводит на мысль, что они вращаются, подобно вертушке. Такое представление в значительной мере подтверждается измерениями скорости и направления движений в отдельных частях галактик.

Можно думать, что они образовались из гигантских газовых облаков путем постепенного гравитационного их сжатия и разогревания. Газовое облако имело первоначальное вращение, затем вращение перешло «по наследству» к галактике (из механики известно, что момент количества движения исчезнуть не может).

Вращаясь, галактика постепенно сплющивалась, и от нее также постепенно разматывались спиральные рукава.

Нечто похожее можно наблюдать, размешивая ложечкой молоко в чашке кофе. Но это же наблюдение показывает, что через несколько оборотов спирали полностью разматываются и исчезают. Иначе говоря, спирали являются неустойчивыми образованиями, поэтому после нескольких оборотов галактик они должны полностью размазаться в кольцо по периферии галактик. Между тем галактики, в том числе и наша, совершили уже десятки оборотов, а спирали не обнаруживают никаких признаков исчезновения. Спиральная галактика — самый распространенный вид скоплений звезд во Вселенной, и понятно, почему астрономы проявили большой интерес к загадке устойчивости спиральных рукавов.

Астрономов заинтриговало еще одно загадочное обстоятельство. В спиральных рукавах обнаружилось много очень ярких молодых звезд. Поскольку каждая из таких звезд не может долго светить с огромной яркостью, значит число их в рукавах все время пополняется. И молодость звезд, и неустойчивость вращения указывали на то, что срок жизни рукавов может составлять лишь несколько миллионов лет. Это находилось в явном противоречии с продолжительностью существования спиральных галактик, составляющей по меньшей мере сотни миллионов лет.

Но вот в конце 60-х годов американские астрофизики Лин и Шу высказали парадоксальную мысль, что спиральные рукава — вовсе не материальные образования, а... бегущие по галактике волны плотности галактического вещества. Чтобы понять всю парадоксальность идеи, надо вспомнить, что для существования волн необходимо действие по крайней мере двух сил: одной — выводящей среду из исходного состояния (например, состояния равновесия) и другой — возвращающей среду в это состояние.

Наличие первой — гравитационной силы — в галактиках очевидно. Второй силой могло бы быть противостоящее давление, как это имеет место в жидкости или внутри самих звезд. Но звезды в галактике не оказывают практически никакого давления друг на друга! И все же Лин и Шу нашли если не само давление, то по крайней мере псевдодавление: во вращающейся галактике на звезды действует центробежная сила, противостоящая силе притяжения звезд к центру галактики. Зная скорость вращения галактики, скорость движения и массу звезд, эту силу можно рассчитать. А затем, считая звезды элементами сплошной среды, вычислить и смоделировать, как будет вести себя галактика при вращении. Результат такого моделирования показан на рис. 65 и не требует особых комментариев: появились рукава.

Однако некоторые замечания мы все же сделаем. Машинный расчет, результаты которого показаны на рис. 65, соответствует достаточно низкой температуре галактической среды, когда, вероятно, еще не началось образование звезд из газового облака.

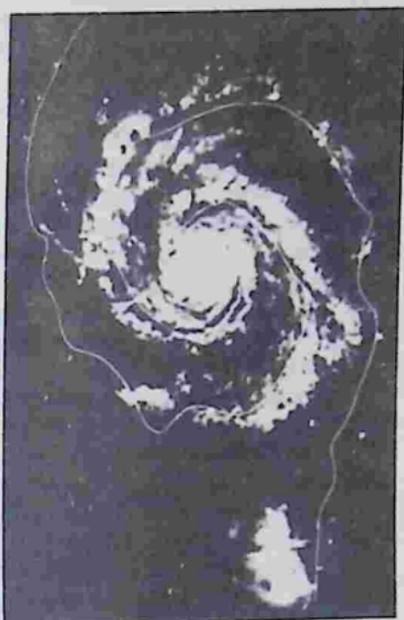
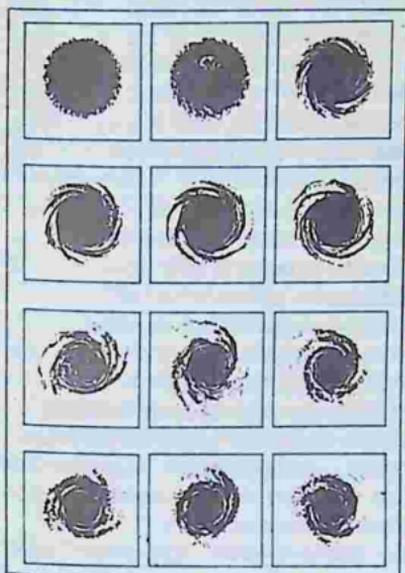


Рис. 65. Графики смоделированного на электронной вычислительной машине распространения волны плотности в галактике, приводящего к появлению спиральных рукавов

Рис. 66. Сравнение звездных и газовых спиральных рукавов в галактике. Данные о газе, показанные белой спиральной линией, получены из радиоастрономических наблюдений

Спирали не всегда состоят из одних и тех же элементов, звезды и межзвездный газ проходят сквозь спирали. Когда газ попадает в максимум волны плотности, он сжимается до такой степени, что из него могут начать образовываться звезды.

Так стало понятным и то, почему в спиральных рукавах много молодых ярких звезд, и то, почему они там образуются. Уже давно было замечено, что к рукавам тяготеют облака межзвездной пыли и газа — этот строительный материал для звезд. И если построить карту распределения плотности облаков, полученную из радиоастрономических наблюдений, то линии равной плотности тоже имеют вид спиралей. Совпадение звездных спиралей с газовыми, отчетливо видимое из рис. 66, подтверждает замечательную мысль о волнах плотности в галактиках.

Волны плотности поистине вездесущи. С их помощью можно описывать и смену циклонов и антициклонов, определяющую разнообразие погоды в различных областях земного шара, и волны численности популяций различных видов животных в разные периоды, и множество других физических и биологических процессов.

Сегодня уже отчетливо прослеживаются главные факторы, выводящие системы — скажем, атмосферу или сообщество животных — из исходного состояния и возвращающие их к этому состоянию или же переводящие их в новые устойчивые состояния. Мы еще раз подчеркиваем, что если эти состояния можно называть равновесными, то только в том смысле, что в них системы находятся в динамическом равновесии с окружающей средой. Другими словами, в отличие от термодинамического «мертвого» равновесия, когда система наглухо отгораживалась от своего окружения, в динамическом «живом» равновесии система активно воспринимает состояние окружающей среды и стремится приспособляться ко всем его изменениям.

Динамическое равновесие для сколько-нибудь длительного существования должно быть достаточно устойчиво, чтобы система не разваливалась от любого случайного или малого изменения ее окружения. Поэтому такие устойчивые состояния обладают порогом, о котором мы упоминали в связи с возникновением нервного импульса. При «надпороговом» воздействии окружения начинается приспособление системы к новым обстоятельствам путем перехода ее в новое устойчивое состояние.

Для нашего разговора наиболее существенно, что этот переход носит характер распространения волн. Зачастую не важно, коротко или длительно внешнее воздействие, имеет оно постоянный или периодический характер. Волны, возникающие в системе, ведут себя так, словно они не помнят о своем происхождении и руководствуются только свойствами самой системы, в которой они распространяются.

О существовании подобных порогов говорят и два явления, о которых мы в заключение расскажем. Строго говоря, это «не совсем» волны, а структуры, периодические в пространстве, но не во времени. С волнами, о которых мы говорили выше, их роднит единый общий механизм развития (в наше оправдание можно было бы добавить, что и стоячие волны выглядят «не как волны», а являются периодическими в пространстве). Речь идет о ячейках Бенара и вихрях Тейлора.

В 1900 году французский физик Г. Бенар поставил следующий простой опыт. Он налил жидкость в мелкий сосуд с плоским горизонтальным дном и начал равномерно подогревать ее снизу. Как и следовало ожидать, внизу образовывался слой жидкости с меньшей плотностью, который должен был всплывать наверх, а на его место должны были опускаться более холодные слои, то есть должна была возникнуть конвекция, благодаря которой вообще удается подогреть воду в чайнике или обеспечить ровную температуру в комнате. Однако постепенно увеличивая скорость нагрева, то есть перепад температур между нижним и наружным слоями жидкости, Бенар обнаружил, что жидкость неожиданно распалась на отдельные ячейки (рис. 67), причем большинство ячеек имело форму шестигранников. (Именно шестигранников, а не шестиугольников, так как ячейки представляли собой приз-

матические столбики жидкости от поверхности до дна сосуда.)

Жидкость в столбиках, естественно, не была неподвижной, в ней появились вертикальные вихри: либо она поднималась вверх в центре ячейки и опускалась по ее краям (когда вязкость жидкости падала с ростом температуры), либо, наоборот, опускалась в центре ячейки и поднималась по краям (когда вязкость росла с температурой). Такая картина конвекции наблюдалась в довольно широком интервале перепадов температур. При еще больших перепадах ячейки Бенара исчезали, и в жидкости воцарялась турбулентная конвекция.

Почему же первоначально в совершенно однородной среде возникло вдруг упорядоченное движение и почему оно приняло форму шестигранных ячеек? Теперь мы, по крайней мере в принципе, в состоянии это понять. В жидкости происходят два основных процесса: поступающая в нее энергия расходуется на преодоление сил трения, то есть вязкости жидкости, а силы выталкивания более легкого слоя увеличивают запас внутренней энергии в жидкости. В тот момент, когда между расходом и приходом энергии возникает равновесие, и появляется неустойчивость жидкости и возникают ячейки.

Таким образом, мы имеем дело с типичной открытой системой, в которой диссипирует энергия, — диссипативной системой. В ней возникают разного вида колебания, между ними начинается конкуренция, вследствие чего преимущественно «выживают» те виды колебаний, которые приводят к возникновению шестигранных ячеек. (Последнее обстоятельство удалось доказать лишь недавно путем расчета взаимодействия нелинейных волн, до того теория допускала любую форму ячеек.)

Аналогичный — конечно, общий, а не конкретный — физический механизм имеют и вихри, открытые английским ученым Дж. Тейлором в 1923 году. Если залить между двумя концентрическими цилиндрами жидкость и привести внутренний цилиндр во вращение, то по достижении некоторой скорости вращения столб жидкости неожиданно разбивается на отдельные сегменты (рис. 68). Сегменты можно сделать отчетливо видимыми с помощью мелких частиц краски.

Движение жидкости в сегментах сложное: жидкость движется наружу в сечении, которое видно как узкая темная полоска, и внутрь в сечении, разделяющем отдельные сегменты, причем в соседних сегментах движения направлены взаимно противоположно. Ко всему еще жидкость участвует во вращательном движении, которое возбуждается внутренним цилиндром.

Эта картина вихрей сохраняется неизменной до скорости вращения цилиндра, примерно впятеро превышающей ту, при которой возникают расслоенные вихри. Затем начинается постепенный распад вихрей: на них появляются все более высокие изгибные волны, пока, наконец, не образуется турбулентное течение (рис. 69). Отметим еще, что картина вихрей Тейлора в одних и

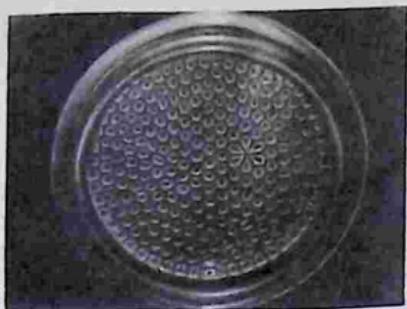


Рис. 67. Ячейки Бенара

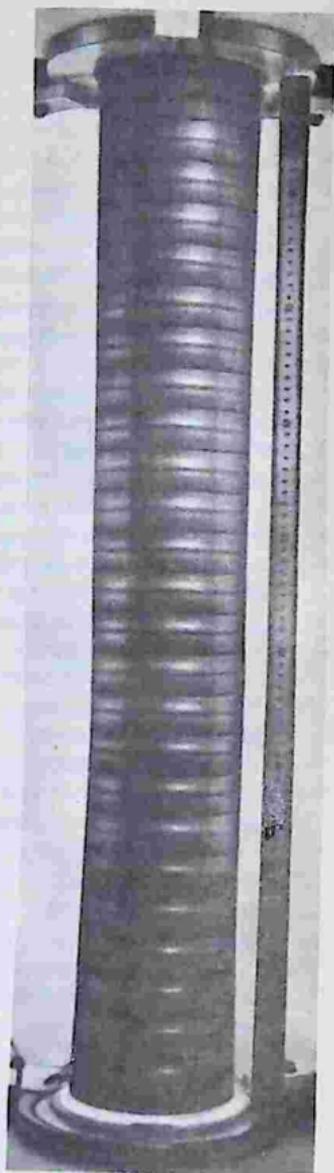
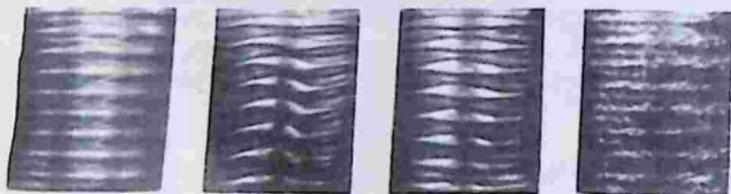


Рис. 68. Вихри Тейлора

Рис. 69. Разрушение вихрей Тейлора при увеличении скорости вращения жидкости



тех же условиях задана «нежестко»: по высоте столба жидкости может возникать разное число вихрей.

В вихрях Тейлора, как и в ячейках Бенара, мы наблюдаем в сущности одно и то же общее поведение изначально однородной системы. Внешнее воздействие на такую систему, даже будучи вполне упорядоченным (вертикальный поток энергии в ячейках и горизонтальный в вихрях), до поры до времени оставляет систему «нечувствительной». Затем неожиданно (но не внезапно!) в однородной дотолем системе самопроизвольно возникает некая пространственная организация (ячейки или вихри в наших примерах, регулярно, периодически расположенные в пространстве). При дальнейшем усилении внешнего воздействия эта организация сохраняется в некотором диапазоне воздействий, затем постепенно расшатывается и, наконец, исчезает вовсе, сменяясь хаосом.

Правда, конечный хаос не напоминает начальный, беспорядочное турбулентное движение отличается от состояния покоя, хаотичность переместилась с уровня движения отдельных молекул на уровень движения отдельных элементов сплошной среды.

Возникновение правильных и устойчивых вихрей во вращающейся жидкости можно наблюдать и в других условиях. Недавно такое явление продемонстрировали советский ученый А. М. Обухов и его сотрудники в опыте с вращением тонкого слоя жидкости в сосуде, напоминающем сковороду. В отличие от опыта Тейлора жидкость приводилась во вращение не вращением сосуда, а электромагнитной силой. Для этого была взята электропроводная жидкость (раствор медного купороса), а под дном сковороды расположено несколько кольцеобразных магнитов полюсами навстречу друг другу. Чтобы сделать движение жидкости видимым, в нее насыпались алюминиевые опилки. Силу, приводящую жидкость в движение, можно было регулировать, меняя ток, пропускаемый через жидкость в направлении от центра к краям сковороды.

Вначале, при малых скоростях, ничего особенно интересного не наблюдалось. Жидкость разбивалась на несколько концентрических поясов, и в двух смежных поясах, в соответствии с противоположными знаками магнитного поля, ее вращение происходило в противоположных направлениях. Но затем, когда скорость, возрастая, достигла некоторого критического значения, в жидкости внезапно появились три крупных симметрично расположенных вихря, а между ними — три маленьких вихря (рис. 70).

Вихри устойчиво существовали в довольно широком диапазоне скоростей вращения жидкости. (Заметим, что, как и в опыте Тейлора, число вихрей задано «нежестко»: в кольцевом сосуде может образовываться и большее число вихрей.)

Этот эксперимент и полученные в нем результаты имеют не только научное значение. Метеорологи уже давно догадывались, что в земной атмосфере существуют крупномасштабные вихре-



Рис. 70. Картина вихрей, возникающих при определенной скорости вращения жидкости в мелком сосуде

вые движения, называемые циклонами. В сущности смена циклонов антициклонами определяет погоду на земном шаре. Когда первые искусственные спутники поднялись над границами атмосферы, сделанные с них фотоснимки превратили догадки метеорологов в реальность: на снимках были отчетливо видны гигантские воздушные вихри, «проявленные» облаками.

Хорошо известно, что ветры вызываются неравномерным прогревом атмосферы солнечными лучами. Но даже сегодня все еще не очень понятно, как ветры «организуются» в циклоны. Атмосфера чрезвычайно тонка, «метеорологический» ее слой имеет высоту всего лишь порядка десяти километров при протяженности во многие тысячи километров. По существу она выглядит как мелкая сковорода, и опыт А. М. Обухова наглядно продемонстрировал, что образование в ней крупных вихрей можно хорошо моделировать и изучать на лабораторном столе.

Правда, в отличие от жидкости в эксперименте атмосфера не плоская и вращается вместе с земным шаром, так что возникает кориолисова сила. Эта сила, как известно, заставляет ветры менять свое направление, но, конечно, не является причиной образования циклонов. Однако условие относительной малости кориолисовой силы, видимо, выполняется не везде.

Так, уже более трехсот лет известно, что атмосфера Юпитера имеет «полосатый» вид, а также имеет еще одну примечательную особенность — долговременно существующее так называемое

красное пятно. Недавно с американского межпланетного корабля «Вояджер» удалось получить детальные снимки атмосферы этой планеты. Оказалось, действительно, что атмосфера Юпитера разбита на множество широтных поясов, между которыми располагаются вихревые «дорожки». Красное пятно оказалось гигантским вихрем.

Расчет позволил предположить, что почти полное отсутствие вихрей (аналога земных циклонов) в атмосфере Юпитера можно приписать действию именно кориолисовой силы, очень большой на этой гигантской планете. Интересно еще, что красное пятно можно истолковывать как огромный двумерный солитон. Это указывает на волновую природу перестройки, самоорганизации течения газов и жидкостей при определенных условиях их движения.

И снова мы встречаемся с интереснейшим явлением возникновения порядка из беспорядка, явлением самоорганизации материи.

Этот вопрос сейчас чрезвычайно активно атакуется учеными самых разных специальностей — физиками, химиками, биологами, математиками и даже обществоведами. И, прочитав эту главу, можно лучше понять, что объединяет этих столь разных исследователей.

Такие несхожие явления, как, скажем, волны в жидкости или нервные импульсы, могут быть описаны на языке немногих общих математических моделей. Проверка правильности моделей и уточнение их в случае необходимости, отыскание смысла и конкретных значений величин и параметров, входящих в уравнения для моделей, — дело специалистов в конкретных областях знания. В их же компетенции отыскание смысла найденных решений.

Естественно, что эти решения относятся к самым общим свойствам систем, но именно с отыскания таких свойств начинается количественное исследование в любой области науки.

И то, что на сегодняшний день стало известно из таких исследований, позволяет высказать несколько общих представлений, имеющих касательство к теме данной книги.

Процессы, происходящие во многих неживых и живых системах, очень часто имеют волновой характер. Такой же характер имеют и переход от хаоса к порядку, самоорганизация систем, и процесс их перестройки под влиянием внешних воздействий для достижения новой, более устойчивой организации, лучше приспособленной к изменившимся внешним условиям.

Похоже, что весь процесс эволюции материи — от газовых облаков к галактикам и звездам, от первобытного земного океана к живым организмам, от нашего пращура к современному обществу сопровождается теми или иными волновыми процессами.

Так что не исключено, что если этой книге суждено выдерживать переиздание в не столь отдаленном будущем, название пос-

ледней ее главы придется изменить. Наука о самоорганизации систем — ее называют синергетикой — развивается очень стремительно, а необычные волны столь же быстро утрачивают свою необычность и среди ученых, и среди широкой публики.

Да и саму книгу, быть может, придется назвать иначе. Химия и биология в союзе с физикой и математикой, пожалуй, убедят многих из читателей книги, что волны существуют не только вокруг нас, но и в нас самих и, можно так сказать, всегда и во всем сопровождают нас.

А началось все с того, что кто-то обратил внимание на регулярность морских валов у берега или внимательно понаблюдал, как разбегаются волны от камешка, брошенного в лужицу...

Оглавление

Вместо предисловия 3

Введение 6

Глава первая. Волны на воде 19

Глава вторая. Длинные волны 39

Глава третья. Ветер и волны 58

Глава четвертая. Волны и берега 82

Глава пятая. Корабли и волны 96

Глава шестая. Волны на песке 111

Глава седьмая. Необычные волны 127

Кадомцев Борис Борисович
Рыдник Виталий Исаакович

ВОЛНЫ ВОКРУГ НАС

Главный отраслевой редактор
В. Демьянов
Редактор **Н. Яснопольский**
Мл. редактор **М. Вержбицкая**
Художник **В. Конюхов**
Худож. редактор **М. Гусева**
Техн. редактор **Л. Солнцева**
Корректор **С. Ткаченко**

ИБ № 3006

Сдано в набор 15.09.80. Подписано к печати 27.05.81. А 04212.
Формат бумаги 60×90^{1/16}. Бумага офсетная № 1. Гарнитура школьная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,5. Усл. кр.-отт. 19,42.
Уч.-изд. л. 10,21. Тираж 80000 экз. Заказ У-396. Цена 40 коп.
Издательство «Знание» 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд
Серова, д. 4. Индекс заказа 817719.
Типография издательства Тат. ОК КПСС
г. Казань, ул. Декабристов, 2.