

Волна набегают на берег

А. КНЯЗЕВ

Посвящается Юлию Александровичу Данилову

СМОТРЕТЬ НА БЕГУЩУЮ ВОДУ – ОДНО ИЗ ЛЮБИМЕЙШИХ занятий отдыхающего человека. Прошлым летом автор случайно обратил внимание на явление, мимо которого, наверное, проходил всю жизнь. Спасаясь от невероятной жары в Саратове, мы с другом на целых десять дней приехали в тихое место на Волге, где мы отдыхаем уже не первый год. Это было чудесно – у самой воды жара практически не ощущалась. Мы сидели на веранде и созерцали волны, бьющие в пологий песчаный берег в нескольких метрах от нашего домика. В сильный ветер волны были беспорядочные – они прокатывались вдоль берега и шлифовали песок в разных направлениях, выкидывая траву и пену. Но вот когда ветер умерял свой напор, волны становились довольно регулярными и похожими на синусоидальные валы, следующие один за другим. И тогда линия берега оказывалась периодически изъеденной глубокими зубцами (рис.1). После этого открытия созерцание перешло в стадию наблюдения и поиска гипотезы.

Автору, знакомому с радиофизикой и оптикой, показалось, что объяснить возникновение регулярного профиля песчаного берега довольно просто – достаточно вспомнить об интерференции волн. И действительно, поскольку волны периодически с одной и той же частотой и под одним и тем же углом ударяют о берег, то выпуклости на песке образуются в тех областях, куда приходятся максимумы волн. Эти максимумы всей массой воды ударяют в песок и создают горку. А в местах, приходящихся на минимумы регулярной волновой картины, песок остается нетронутым. Нетрудно подсчитать (рис.2), что период образующейся структуры равен $X = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$, где λ – длина волны, а α – угол набегания волнового фронта вблизи самого берега. Однако уже в первый момент после получения формулы начинаешь осознавать необычность ситуации: стационарная картина образо-

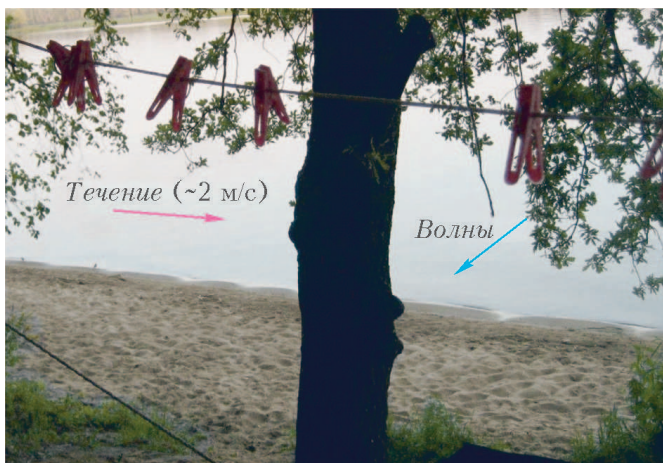


Рис. 1

валась у нас без участия второй системы волн, необходимой для возникновения интерференционной картины. Получается, что наблюдаемый рельеф не является результатом интерференции волн!?

По-видимому, причиной всему наличие соответствующей скорости сноса волновой картины за счет течения и мягкий песчаный берег, останавливающий набегающую волну и направляющий всю ее энергию на создание горки (далее эта вода просачивается вниз, разрыхляя песок). В результате волна не скользит вдоль берега, и каждый новый удар водяного вала приходится в одно и то же место. Пожалуй, именно это обстоятельство – практически полное отсутствие отраженных волн – и привлекло в какой-то момент рассеянное поначалу внимание автора.

Очевидно, что, когда волны нерегулярные, некогерентные, такой постоянной картины уже не наблюдается – она непрерывно возникает в разных местах, «съезжает» из одного положения в другое, и образующийся рельеф размывается. Не будем приводить иллюстрирующую фотографию – такое видел каждый.

На этом, собственно, можно было бы остановиться. Хотя нужно все-таки отметить, что описанный эффект наблюдается не так уж часто и держится буквально несколько часов. Так, волны, бегущие под очень острым углом, почти не останавливаются или достаточно хорошо отражаются. Волны с большой амплитудой заплескивают далеко на берег и также не образуют песчаного вала. Регулярный профиль не образуется и в тех местах, где берег жесткий. Так что автору в какой-то мере повезло.

И все-таки несколько смущает очень уж несинусоидальная форма образующегося профиля – возникшие между холмиками низины имеют слишком резкую форму. Впрочем, волны на воде тоже не имеют синусоидальный профиль. И это можно проверить, например... на рыбалке. Чтобы не отвлекаться от главного, об этом интересном факте будет сказано в Приложении к статье.

Итак, именно несинусоидальностью волн можно объяснить форму промывного на песке профиля. Однако современная физика все чаще говорит о необходимости учета в процессах формообразования так называемых нелинейных явлений, утверждая, что именно в их изучении заключается будущее развитие науки. В основе нелинейной физики лежит известный шахматный принцип: после каждого сделанного хода рекомендуется новая оценка позиции. Так и в физике – в анализируемой системе каждое явление, едва начавшись, изменяет саму систему, и на следующем шаге нужно учитывать произошедшие изменения.

Вот и мы присмотримся к наблюдаемому явлению, отталкиваясь от нашей элементарной теории возникновения рельефа. На фотографии, воспроизведенной на рисунке 3, видны несколько стадий того, что происходит в области минимума песчаного рельефа.¹ Да ведь это же самая на-

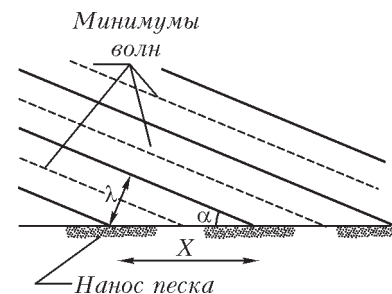


Рис. 2

¹ Лучшее всего это было бы видно на видеоролике. Автор уверен, что уже в скором времени такие просмотры будут организованы в видеоприложениях к журналам. А пока читатели могут просто поспешить на берег речки и воочию увидеть все, что здесь описано. Нужно лишь набраться терпения.



Рис. 3

стоящая кумулятивная струя, промывающая едва заметный поначалу минимум! Вода, не успевшая просочиться и скатывающаяся с песчаных холмиков, мощным выстрелом выплескивается из области интерференционного минимума при схлопывании возникшей водяной ямки. Здесь мы не будем объяснять, что такое кумулятивный эффект.² Сейчас каждый слышал о кумулятивных снарядах и даже может почувствовать кумулятивный эффект на себе, когда шлепает по лужам, моет чашку под струей вертикально падающей из крана воды или когда оказывается облитым водой от проехавшего по луже автомобиля.

Теперь, по-видимому, стало яснее, как возникает наблюдаемый профиль береговой линии. Впрочем, наблюдения можно и продолжить. Заметим, например, что длина волн, создающих кумулятивную ямку, раз в сто меньше, чем длина основных волн. Дело в том, что вторичные волны стекающей воды имеют совершенно другую физическую природу – это уже капиллярные волны, в отличие от первичных гравитационных волн. Вот к чему приводит действие нелинейных эффектов в такой простой, казалось бы, ситуации, как набегание волны на берег!

Нечто похожее может проявляться и в других подобных явлениях, например в физике электронных приборов, в коллективных биологических явлениях, да мало ли где еще. А может, примерно так сформировались знаменитые норвежские фиорды? Подобный подход, объединяющий ученых из далеких областей знаний, сейчас называют синергетическим. Мой хороший знакомый, математик, переводчик многих интересных книг и очень светлый человек Юлий Александрович Данилов говорил, что если смешать в мешке линейные и нелинейные эффекты, то выбранный затем наугад эффект почти наверняка окажется нелинейным.

Приложение. Как визуально оценить синусоидальность волн

Решение данного вопроса хорошо описано, например, в книге С.М.Рытова «Введение в статистическую радиофизику» (М.: Наука, 1976). Однако добраться до нее доведется не каждому читателю, да и книга в целом довольно сложная. А вопрос очень интересный.

Простое наблюдение за спокойными волнами на воде дает ощущение их синусоидальности. Приглядевшись, можно заме-

² О кумулятивном эффекте можно прочитать, например, в статьях В.Майера «Поучительный опыт с кумулятивной струей» («Квант», 1976, №4) и И.Воробьева «Физика в ложке воды» («Квант», 1994, №4), а также в книгах Л.К.Белопухова «Физика внезапного» (Библиотечка «Квант», вып.116) и В.В.Майера «Кумулятивный эффект в простых опытах» (М.: Наука, 1989).

тить, что эти волны часто имеют плоское дно и обостренную вершинку (рис.4). Любопытные читатели знают, что поплавок, например, качается в воде



Рис. 4

не поступательно вверх-вниз, а движется по эллиптической или циклоидальной траектории. Однако и с такими знаниями трудно представить, как все это связано с профилем волны. Конечно, можно провести измерения или найти уже готовое решение в гидродинамике (нелинейные волны), однако в физике в ряде подобных ситуаций для упрощенной оценки характеристики явления используют понятие вероятности.

Казалось бы, при чем здесь вероятность, ведь процесс является обусловленным, детерминированным? Обычно в классическом естествознании предполагается, что всю цепочку трудноопределимых событий, приведшую к данному исходу, в принципе можно восстановить. «Бог не играет в кости», – на этом тезисе настаивал Альберт Эйнштейн. Полученный вероятностными методами результат воспринимается здесь, скорее, как промежуточный на данном этапе решения задачи – как оценку, сделанную преднамеренно с целью упрощения или от неполноты сегодняшних знаний. При таком подходе случайность можно рассматривать как явление, мешающее и путающее планы.

В нашем случае в роли случайности интуитивно выступает многообразие возможных форм волн. Предположим, что волны все-таки синусоидальны, и определим вероятность того, что в некоторый в момент времени t мы застанем колебательный процесс вида $u = u_m \sin \omega t$ в небольшом интервале значений от некоторого u до близкого значения $u + du$. С одной стороны, значение искомой вероятности dW с очевидностью пропорционально выбранному нами интервалу значений du . Запишем поэтому простейшую линейную пропорциональность:

$$dW = f(u) du$$

– чем больше выбранный интервал, тем с большей вероятностью можно предугадать благоприятный исход. Коэффициент $f(u)$, зависящий от выбранного значения, называют функцией распределения данного значения в исследуемом процессе. Пока эта функция неизвестна, но ее получение решает всю задачу. С другой стороны, физическую вероятность можно интуитивно (пока ограничимся этим) определить как отношение времени существования благоприятного исхода ко всему периоду колебаний:

$$dW = \frac{2dt}{T}$$

Приравняв оба выражения для вероятности, получаем

$$f(u) = \frac{2}{T} \frac{1}{du/dt}$$

Отдельно вычислим необходимую здесь производную нашей функции $u = u_m \sin \omega t$:

$$\frac{du}{dt} = u_m \omega \cos \omega t = \frac{2\pi u_m}{T} \sqrt{1 - \left(\frac{u}{u_m}\right)^2}$$

Окончательно имеем

$$f(u) \sim \frac{1}{u_m} \frac{1}{\sqrt{1 - (u/u_m)^2}}$$

Из графика функции распределения (рис.5), видно что наибольшая веро-

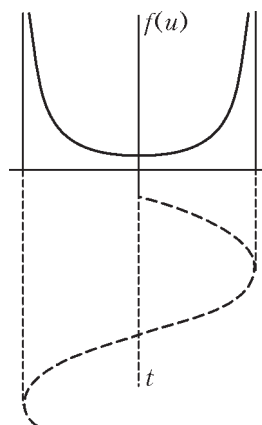


Рис. 5

ПРОГУЛКИ С ФИЗИКОЙ

ятность соответствует одному из крайних состояний – здесь гармонический колебательный процесс проводит наибольшее время. Тогда как вероятность застать случайный процесс в момент прохождения точки равновесия оказывается минимальной.

Рассмотрев совершенно детерминированный процесс с позиций случайных процессов, мы заметили нечто новое. Действительно, если бы волны в пруду или на озере были синусоидальными, то поплавок проводил бы наибольшее время в крайнем верхнем или в крайнем нижнем состоянии. Однако такого не случается – поплавок качается достаточно плавно, без зависания в крайних точках. Значит, эти волны не синусоидальны, вопре-

ки бытующим взглядам. Как, оказывается, полезно иметь несколько точек зрения!

Однако несинусоидальность наблюдаемых волн не помешала нам использовать самые общие соображения об интерференции и когерентности. Действительно, такие основные черты этих явлений, как возможность наложения волн, представления о длине волны и стационарности, к нашим волнам вполне применимы. А математические соотношения, например условия максимумов и минимумов или связь скорости с длиной волны, мы здесь не использовали. При необходимости можно попытаться получить и их. Но это будет уже другая теория.

ПРОГУЛКИ С ФИЗИКОЙ

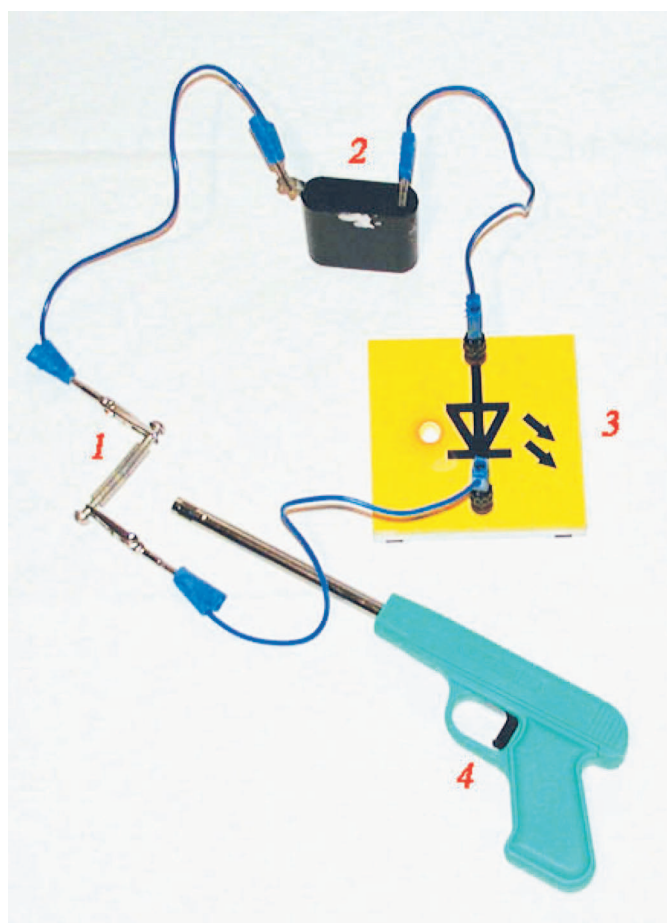
Почувствуй себя А.С. Поповым!

(Начало см. на 4-й странице обложки)

... Возьмите два одинаковых болта диаметром 4–5 мм и гибкую пластиковую, например силиконовую, трубку длиной 50 мм, внутренний диаметр которой чуть меньше диаметра болта. С помощью напильника сделайте торцевую поверхность болтов гладкой и ровной. Вкрутите один из болтов внутрь трубки почти до ее середины. Потом возьмите железный гвоздь и напильником изготовьте небольшое количество железных опилок. Поставьте трубку с болтом вертикально и засыпьте опилки в ее открытый конец – они должны заполнить трубку приблизительно на 1 мм ее длины. Теперь вкрутите второй болт так, чтобы сопротивление между болтами составило 10–50 кОм. Когерер готов.

Чтобы убедиться в том, что когерер «работает», возьмите пьезоэлектрическую зажигалку, дающую только искру, без пламени (такую зажигалку можно купить за 50 рублей в магазине). Если когерер сделан правильно, то искра будет уменьшать сопротивление когерера до сотен, а иногда и до десятков ом. После этого, слегка постучав по когереру, можно опять привести его в рабочее состояние.

Работу когерера можно сделать видимой, и не используя измеритель сопротивлений. Соберите очень простую



схему (см. рисунок) из когерера 1, батарейки 2 с ЭДС 4,5 В и светодиода 3, включенных последовательно. Сопротивление когерера сначала оказывается довольно большим, и светодиод не горит. Если искра зажигалки 4 возникнет на расстоянии не больше 20 см, то сопротивление когерера упадет, и светодиод загорится.

Так можно действительно почувствовать себя А.С. Поповым!

К. Богданов