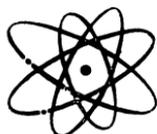


**Л. А. ЧУЛЬСКИЙ**

# **У**СТОЙЧИВОСТЬ **В ПРИРОДЕ**

Л. А. ЧУЛЬСКИЙ

**Устойчивость  
В  
природе**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»  
Москва 1965

*Устойчивость (или неустойчивость) — важное свойство всех форм движения материи от простейшего механического движения — перемещения тел в пространстве — до таких сложных форм, как мышление и общественная жизнь отдельного человека и коллектива.*

*В этой книге в популярной форме рассматривается устойчивость различных форм движения и ее общие закономерности. Книга предназначается для самой широкой читательской аудитории, включая специалистов и студентов, занимающихся как точными, так и гуманитарными науками.*

*В процессе изложения материала математические сведения используются в минимальном объеме. Однако материал пронизан «духом» точных наук — математики и физики.*

*Книга вполне доступна (при внимательном чтении) учащимся старших классов средней школы.*

*Назначение книги заставило автора вторгнуться в области, специалистом в которых он не является, и пойти на риск некоторых неточностей. Автор будет признателен читателям, которые сообщат ему через издательство «Знание» свои замечания.*

*Автор пользуется случаем поблагодарить товарищей, с которыми он советовался о плане, содержании и самом тексте книги. Это канд. хим. наук Т. К. Бруцкус, канд. техн. наук Л. П. Бушуев, М. М. Горячая, докт. техн. наук А. Е. Кобринский, В. И. Левантовский, Р. И. Недзельская, канд. техн. наук О. М. Нудельман, инж. В. Д. Рац.*

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

Трудно, а скорее всего невозможно, назвать такую отрасль в науке, технике и даже в обыденной жизни, в которой бы мы не сталкивались со словом «устойчивость».

Мы говорим: «неустойчивый стол», «неустойчивая погода», «Иван Иванович морально устойчив». Агрономы стараются вывести морозоустойчивые и засухоустойчивые сорта растений, врач беспокоится о больном, у которого неустойчивая температура (говорят — «температура прыгает»). Строители изучают устойчивость нагруженных стержней и пластин, а авиаконструкторы определяют «запасы устойчивости» самолета на разных режимах полета.

Химики ищут условия хранения неустойчивых соединений, разлагающихся под воздействием тепла или света, а экономисты думают, как обойти трудности, создаваемые неустойчивостью спроса населения на мороженое (когда жарко — не хватает, чуть похолодало — не берут, хоть останавливай производство). Последняя задача наиболее остро стоит в местностях с неустойчивой погодой, а у экономистов (особенно в странах, где нет налаженного планового хозяйства) есть и более трудные задачи, связанные с устойчивостью и неустойчивостью производства, потребления, занятости рабочей силы и т. п.

Впрочем, хватит примеров. Впереди мы рассмотрим их еще немало. Что же это за свойство такое — «устойчивость»? Почему оно находит себе применение в столь различных областях жизни? Некоторые думают, что устойчивость означает то же самое или почти то же самое, что равновесие. Но вспомните, что в механике употребляются выражения: «устойчивое равновесие» и «неустойчивое равновесие», Уже из этого ясно, что устойчивость и равновесие — не одно и то же.

Устойчивыми сортами растений считаются не те, которые растут в теплицах, где не действуют никакие внешние воздействия (конечно, кроме воздействий, способствующих жизни и благополучному росту растения), а именно те сорта, которые способны выстоять, устоять под действием жары и мороза, ливней и засухи, ветра и вредных насекомых.

Устойчивость — это способность сохраняться, выживать, выполнять поставленную задачу и идти к намеченной цели, несмотря на мешающие этому воздействия и силы. (Более точное определение понятия «устойчивость» у нас впереди.) Цель этой книжки — рассмотреть объективно существующее в природе явление устойчивости в различных типах явлений, изучаемых различными науками. Такое рассмотрение свойств и явлений, общих для различных наук, вообще характерно для науки середины двадцатого века. Например, кибернетика, оказывающая огромное влияние на современную жизнь и мировоззрение, родилась как наука, изучающая с единой точки зрения процессы управления и связи, ранее изучавшиеся разрозненно в различных науках.

Мы будем рассматривать явление устойчивости тоже с единой точки зрения, стремясь найти то общее, что есть у этого явления, в какой бы области жизни и знания, или, пользуясь терминологией Фридриха Энгельса, в какой бы форме движения материи это явление ни проявлялось.

Термин «устойчивость» употребляется во многих различных смыслах, однако во всех случаях употребления этого слова можно найти нечто общее. Тем не менее не существует точного, единого для всех отраслей, определения этого понятия. Таким определением не является даже наиболее разработанное и математически строгое понятие устойчивости, которое ввел замечательный русский ученый А. М. Ляпунов в 1892 г. в своей всемирно известной работе «Общая задача об устойчивости движения».

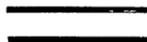
Дело в том, что явления, устойчивые с точки зрения одного определения, иногда оказываются неустойчивыми с точки зрения другого. Поэтому автор старался построить изложение так, чтобы в каждом конкретном случае смысл употребления слова «устойчивость» был по возможности ясным.

Начав с простейших примеров и используя без строгих доказательств немногие необходимые математические рассуждения (это нужно для того, чтобы не только «смотреть» на устойчивость, но и уметь ею пользоваться), мы перейдем к более сложным примерам и явлениям. Но математику мы и дальше будем привлекать только очень немного и только в случаях крайней необходимости.

Некоторые менее подготовленные и более ленивые читатели, даже пропуская все, что им покажется трудным, быть

может, все же найдут для себя кое-что интересное. Для этого не обязательно читать книжку подряд — достаточно заглянуть в оглавление. Сразу же уместно заметить, что то небольшое из математики, что упоминается в этой книге, находит свое применение во многих отраслях знания и поэтому, надо надеяться, пригодится читателю и в других случаях.

Автор будет считать, что он справился со своей задачей, если после прочтения книги читатель заинтересуется явлениями устойчивости и неустойчивости и сможет самостоятельно находить и анализировать их.



---

---

## УСТОЙЧИВОСТЬ В МЕХАНИКЕ. КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ

### Свойства движения и их причины

Нет в природе таких реальных движений, которые происходили бы под действием одних только основных для этого движения причин — всегда вмешиваются и оказывают свое более или менее заметное влияние многочисленные побочные силы или воздействия. Например, на движение автомобиля, помимо сил, создаваемых мотором и реакцией дороги, влияют и многие другие воздействия, и, если влиянием небольшого ветра можно пренебречь, то влажность дороги может послужить причиной катастрофы.

Искусственный спутник вращается вокруг Земли под действием сил земного тяготения, но, если его орбита проходит на сравнительно небольшом расстоянии от поверхности Земли, то в движение вмешиваются силы сопротивления атмосферы, которые различны днем и ночью, над экватором и полюсами и зависят от уровня активности Солнца. На первый взгляд этими силами можно пренебречь — ведь они почти не изменяют форму орбиты спутника, ничтожно мало сказываются на времени одного оборота вокруг Земли. Но если вспомнить, что некоторые спутники «живут» немногие месяцы, а то и недели, а без влияния сопротивления атмосферы они обращались бы вокруг Земли вечно, мы уже не будем утверждать, что эти силы для всех количественных характеристик движения пренебрежимо малы. Раз это так, то, быть может, надо привлечь к рассмотрению движения еще более слабые воздействия? Теоретически на движение спутника влияют все движения на Земле (в том числе и перелистывание этой книги), так как эти движения смещают центр массы Земли. Учитывать такие воздействия уже совершенно невозможно ни теоретически (потому что такие движения нельзя ни предсказать, ни выразить количественно), ни практически (потому что количество и трудоемкость потребных вычислений станут астро-

номически велики). Да это и не нужно, потому что удобнее рассуждать следующим образом.

Основная сила, действующая на спутник, — это сила притяжения Земли. И хотя эта сила тоже известна не абсолютно точно, мы можем сначала рассчитать движение спутника под действием приближенных величины и направления этой силы, а потом попытаться узнать, как изменится движение при воздействии какой-то одной произвольной силы, про которую известно лишь то, что она мала по сравнению с основной.

Эта сила будет объединять собой *суммарное* влияние всех «второстепенных» причин — сопротивления атмосферы, некоторой нешарообразности Земли, электрических и магнитных воздействий на спутник, ударов микрометеоритов и вообще всех воздействий, которые мы ни предсказать, ни перечислить не можем. Слово «второстепенные» стоит в кавычках именно потому, что мы пока не знаем, действительно ли эти причины не оказывают существенного, первостепенного влияния на какие-либо свойства движения. Такую силу в механике обычно называют *возмущающей* силой или, короче, *возмущением*.

На всякое движение, на всякий процесс в природе действуют возмущения, и часто они сильно искажают ту картину движения, которая была бы под действием одной только основной силы.

Изучением условий, при которых можно гарантировать, что возмущения не окажут существенного влияния на процесс, или, наоборот, поиском условий, при которых небольшая возмущающая сила существенно влияет на окончательный результат, занимается *теория устойчивости*. Предмет теории устойчивости несколько грубо, но наглядно иллюстрируется обиходным выражением: «Эта капля переполнила чашу». Полезно заметить, что выяснить это становится труднее, когда чаша уже почти полна. На каком именно обороте упадет на Землю ее искусственный спутник? И насколько велика должна быть капля, переполнившая чашу? Ведь понятие «небольшой» — довольно растяжимое. Как бывают крупные капли, так и в теории устойчивости рассматриваются не только малые возмущения. Часто приходится решать задачи, где возмущающие силы больше основных. Иногда это бывает потому, что «главная» сила равна нулю. Продумайте сами, почему падает карандаш, который пытаются поставить на стол остро заточенным концом? Какую из действующих на него сил считать главной? А теперь перейдем к примерам.

### Колебательные процессы

Первые примеры, которые мы сейчас рассмотрим, имеют принципиальное значение.

Подвесьте на пружине грузик (рис. 1) и заставьте его

колебаться. Затем зажмурьтесь и предложите товарищу подтолкнуть грузик вверх или вниз или вовсе не трогать его. Выждав еще несколько секунд, откройте глаза и попытайтесь узнать, касался ли ваш товарищ грузика и какое именно возмущение он приложил. Может быть, вы случайно угадаете, но узнать вы ничего не сможете, потому что движение груза быстро становится почти таким же, каким оно было до приложения возмущающей силы.

Второй пример. По круговой орбите вокруг Земли вращается спутник (рис. 2). Его скорость по траектории есть  $v$ .

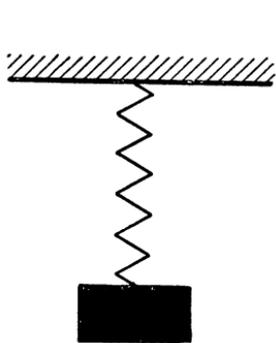


Рис. 1.

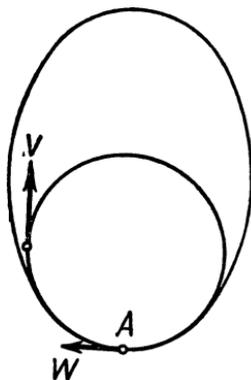


Рис. 2.

В момент, когда он находится в точке  $A$ , «подтолкнем» его, т. е. сообщим ему дополнительную скорость  $w$  (для простоты — касательную к его орбите). Пусть скорость  $w$  будет не слишком маленькой, но и не слишком большой. Круговая орбита превратится в более или менее вытянутый эллипс, по которому спутник и будет двигаться неограниченно долго (как движется Луна!).

Мы видим, что здесь изменение движения в результате приложенного возмущения сохраняется, а не затухает, как в первом случае. (Слово «затухает» не взято в кавычки потому, что это принятый в теории колебаний и в теории устойчивости термин).

Интуитивно ясно, что если возмущение невелико (невелика дополнительная скорость  $w$ ), то эллипс получится близким к окружности; если возмущение достаточно большое, то эллипс окажется заметно вытянутым<sup>1</sup>.

Полезно заметить, что в этом примере, так же, как в пер-

<sup>1</sup> Желаящие понять второй и третий примеры не «интуитивно», а достаточно строго, могут прочесть об этом в книге В. И. Левантовского «Ракетой к Луне» (Физматгиз, 1960).

вом, мы сталкиваемся с *колебательным процессом*, хотя здесь это и не сразу бросается в глаза.

Многие величины, характеризующие движение (такие величины часто называют параметрами<sup>1</sup>), периодически повторяются, т. е. колеблются. Повторяются максимальное и минимальное расстояния спутника от Земли, географическая широта мест, над которыми пролетает спутник (для долготы это не так из-за вращения Земли), периодически изменяются и величины потенциальной и кинетической энергии спутника — в апогее наибольшей величины достигает потенциальная энергия, а кинетическая энергия в этот момент, конечно же, минимальна (иначе не может быть из-за закона сохранения энергии); в перигее наоборот — при минимуме потенциальной энергии кинетическая достигает своей наибольшей величины.

Третий пример. Пусть спутник с самого начала движется по вытянутой эллиптической орбите. Снова «подтолкнем» его в той же точке *A*, т. е. сообщим ему некоторую дополнительную скорость  $w$ . Если эллипс достаточно вытянут или скорость  $w$  достаточно велика, то суммарная, получившаяся после толчка, скорость станет больше второй космической скорости (ее иногда называют также *параболической скоростью* или *скоростью освобождения*), эллипс «разорвется» и спутник улетит из той части пространства, где земное притяжение является для него главной силой. Чем более вытянут эллипс, тем меньшая прибавка скорости  $w$  нужна для «разрыва» замкнутой эллиптической траектории. Как бы ни была мала величина  $w$ , всегда можно найти настолько вытянутый эллипс, что эта малая величина дополнительной скорости «разорвет» его и переведет спутник на незамкнутую траекторию. (Кстати сказать, в этот момент рассматриваемое небесное тело теряет право называться спутником, оно больше уже не будет *сопутствовать* Земле в ее движении вокруг Солнца, а само превратится в планету, движущуюся вокруг Солнца.)

Сравним роль возмущений в этих трех примерах.

Каждый, наблюдавший движение груза на пружине, знает, что если подтолкнуть груз даже со значительной силой, то и тогда размах качаний, называемый в теории колебаний *амплитудой*, возрастет лишь ненадолго; через некоторое время движение вновь будет происходить с не очень большой амплитудой<sup>2</sup>.

Во втором случае возмущение заметно исказило орбиту и время обращения спутника вокруг Земли и это искажение

---

<sup>1</sup> Автор не может более понятно объяснить, что такое параметр. По-видимому, в какой-то степени прав один американский ученый, утверждавший, что «параметр — это понятие, которое специалисты употребляют для запутывания читателя».

<sup>2</sup> Аналогичное явление происходит при катании на качелях.

не затухло. В третьем же примере возмущение совершенно изменило характер движения, причем, если спутник движется по очень вытянутому эллипсу, этот результат может быть достигнут с помощью очень малого возмущения. В чем же дело?

Обратимся к помощи математики.

### Математическое описание колебаний

Если есть две взаимозависимые переменные величины, — в нашем первом примере это время  $t$  и отклонение грузика  $x$  от положения равновесия, то их зависимость друг от друга можно изобразить графически (рис. 3). Для этого начертим

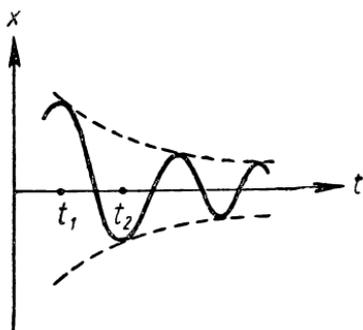


Рис. 3.

две взаимно перпендикулярные оси и выберем на каждой из них некоторый масштаб. Скажем, 1 см на вертикальной оси будет изображать 1 мм отклонения груза, а 1 см на горизонтальной — 1 сек времени. Затем каждое отклонение груза отметим точкой так, чтобы перпендикуляр, опущенный из этой точки на ось времени, проходил через отметку, изображающую то время, к которому относится данное отклонение грузика. Такой чертеж называется *изображением в прямоугольных декартовых координатах*. Этим способом можно изображать самые различные процессы, но сейчас мы применили его для изображения колебаний грузика.

Изменяющееся положение грузика изображается на рис. 3 сплошной линией. Пунктирная линия показывает, как изменяются *максимальные отклонения* от положения равновесия. Интервал времени между двумя максимальными отклонениями груза в одну и ту же сторону называется *периодом колебаний*.

Можно получить и количественное выражение, показывающее, как зависит от времени отклонение грузика от положения

равновесия. Такое выражение называется *уравнением движения*.

Когда грузик отклонен от положения равновесия на расстояние  $x$ , на него действует сила растянутой или сжатой пружины, которая стремится вернуть его к положению равновесия. Эта сила вызывает пропорциональное своей величине ускорение грузика. Ускорение тем больше, чем больше отклонение и чем жестче пружина, и тем меньше, чем больше масса грузика (вспомните второй закон Ньютона: сила = масса  $\times$  ускорение). Если вместо слов «больше» и «меньше» можно поставить слова «во столько же раз больше» (или «меньше»), т. е. в уравнении все члены связаны друг с другом пропорциональной зависимостью, то такие процессы и описывающие их уравнения называются *линейными*. В нашем случае положения точек системы и их скорости и ускорения связаны между собой прямо пропорционально, т. е. входят в уравнения 1-й степени, а масса и жесткость пружины, влияющие на характер движения, сами не меняются в процессе движения.

Следовательно, можно записать: *масса  $\times$  ускорение груза = — жесткость пружины  $\times$  отклонение груза*.

Знак «—» перед правой частью показывает, что ускорение направлено в сторону, противоположную отклонению от положения равновесия.

Отклонение груза мы обозначили буквой  $x$ . Обозначим массу буквой  $m$ , жесткость пружины  $k$ , а для ускорения применим принятый в механике способ обозначения, который состоит в следующем: скорость изменения величины — в нашем случае скорость изменения положения — обозначают той же буквой, что и саму величину, но только с точкой над ней.

Скорость груза по этой системе надо обозначать  $\dot{x}$ . Но ведь ускорение есть скорость изменения скорости и, значит, его можно обозначить той же буквой  $x$  с двумя точками наверху —  $\ddot{x}$ . Наше уравнение приобретает, как и приличествует самому лаконичному из всех языков — математическому, — компактный вид:

$$m\ddot{x} = -kx.$$

Этой формуле подчинено движение подвешенного на пружине грузика, который не подвергается действию возмущения и не испытывает сопротивления среды. Важное влияние этих двух «не» мы разберем немного позже, а пока попробуем решить это уравнение. Для простоты будем считать  $m = 1$  и  $k = 1$ , т. е. рассматривать уравнение  $\ddot{x} = -x$ .

Посмотрим на рис. 4, где изображены графики синуса и косинуса. Видно, что чем быстрее растет или убывает синус, тем больше или соответственно меньше косинус.

То же самое верно и наоборот с той лишь разницей, что

чем быстрее растет косинус, тем меньше синус (рассматривать величину функций нужно, конечно, с тем знаком «+» или «-», который они имеют в рассматриваемый момент времени  $t$ , отложенный на горизонтальной оси — оси абсцисс).

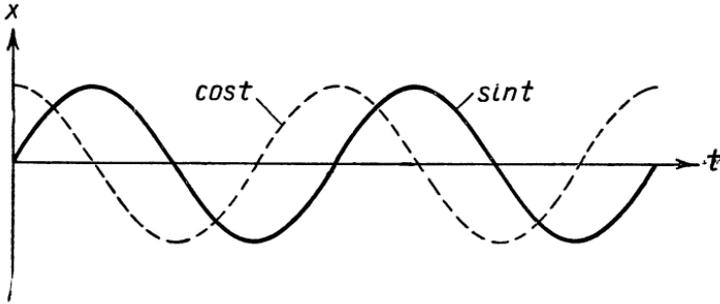


Рис. 4.

Найдем скорость роста синуса. Так как она все время меняется, нам придется искать мгновенную скорость, т. е. изменение величины за малое время, поделенное на это время. Обозначим малое изменение времени через  $\Delta t$ . Тогда, если в начале этого промежутка времени  $x = \sin t$ , то в конце его  $x = \sin(t + \Delta t)$ , а скорость изменения величины за время  $\Delta t$  составит  $\dot{x} \approx \frac{\sin(t + \Delta t) - \sin t}{\Delta t}$ . Это равенство тем точнее, чем меньше  $\Delta t$ . По известной со школьных лет формуле для синуса суммы числитель правой части можно «раскрыть»:

$$\sin(t + \Delta t) - \sin t = \sin t \cos \Delta t + \cos t \sin \Delta t - \sin t.$$

Чем меньше промежуток времени  $\Delta t$ , чем ближе он к нулю, тем меньше  $\cos \Delta t$  отличается от единицы. Благодаря этому первый и третий члены в правой части последнего выражения взаимно уничтожаются. Это, конечно, не вполне точно, но ведь выражение для скорости само приближенное (знак  $\approx$ !). Поэтому мы имеем право отбросить слагаемые, которые в сумме приближенно равны нулю. Важно понимать, что наши вычисления тем точнее, чем меньше промежуток времени  $\Delta t$ , а когда мы перейдем от средней скорости за малое время к мгновенной скорости, то наши вычисления превратятся в абсолютно точные.

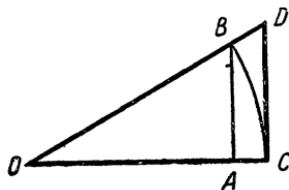
Скорость изменения синуса теперь приобретает вид

$$\dot{x} \approx \cos t \frac{\sin \Delta t}{\Delta t}.$$

Из рис. 5 видно, что, если величина  $\Delta t$  мала, то она немножко больше своего синуса и немножко меньше своего тангенса:  $\sin \Delta t < \Delta t < \operatorname{tg} \Delta t$ .

Но  $\operatorname{tg} \Delta t = \frac{\sin \Delta t}{\cos \Delta t}$  и, поскольку косинус малого угла близок к

единице,  $\text{tg} \Delta t \approx \sin \Delta t$ . «Зажатое» между двумя близкими друг другу величинами  $\Delta t$ , вынуждено быть близким им обоим. Значит,  $\sin \Delta t \approx \Delta t$ ; дробь в правой части формулы скорости



$$\frac{\overset{\sim}{BC}}{OC} = \Delta t; \quad \frac{AB}{OC} = \sin \Delta t$$

$$\frac{CD}{OC} = \text{tg} \Delta t$$

Рис. 5.

приблизительно равна единице и скорость изменения синуса действительно есть значение косинуса в тот же момент времени, в который рассматривается синус и его скорость:  $\dot{x} = \cos t$ <sup>1</sup>. Подобным же образом можно доказать и то, что ускорение изменения синуса равно синусу, взятому со знаком минус. Из рис. 4 видно, что вместо слова «синус» можно писать «косинус» — все останется верным.

Следовательно, отклонение груза от положения равновесия, его скорость и ускорение меняются по синусоидальному закону, в точности повторяясь через некоторое время, называемое *периодом*. Большие подробности нам сейчас ни к чему.

Если теперь отказаться от предположения, что  $m = 1$  и  $k = 1$ , т. е. допустить, что масса груза и жесткость пружины могут быть любыми, то в выражении  $\sin t$  появятся коэффициенты перед буквой  $t$  и перед самим знаком синуса. Это происходит потому, что масса и жесткость влияют на период колебаний, а из-за этого меняются скорости и ускорения (если даже амплитуда колебаний остается без изменения; посмотрите на рис. 6).

Разберем теперь влияние второго важного «не», отмеченного на стр. 11. Реальное тело при движении всегда испытывает какое-то сопротивление среды. Если это трение грузика и пружины о воздух, то оно невелико. Если же к грузику жестко прикреплен поршень, движущийся в цилиндре с мас-

<sup>1</sup> Для того, чтобы здесь и в дальнейшем избавиться от слова «приблизительно» и знака  $\approx$ , нужно только вспомнить изучавшуюся в школе теорию пределов.

лом (рис. 7), то сопротивление среды увеличивается. Опыт показывает, что в подавляющем большинстве случаев это сопротивление можно принимать пропорциональным скорости движения груза. Следовательно, в формуле на стр. 11 добавится

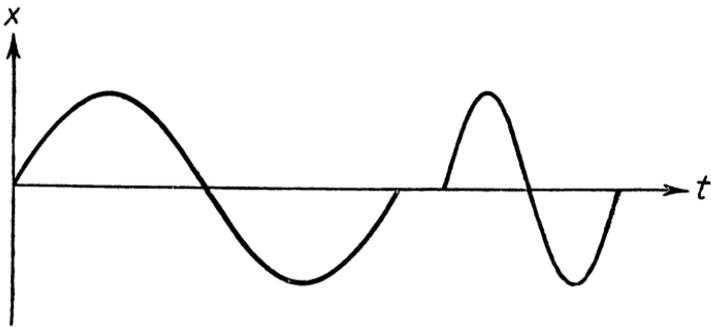


Рис. 6.

слагаемое  $R\dot{x}$  ( $R$  — коэффициент сопротивления). В решение по-прежнему будут входить синусы и косинусы. Но оно уже не может быть чисто периодическим. Ведь из-за сопротивления колебания будут затухать и процесс изобразится сплош-

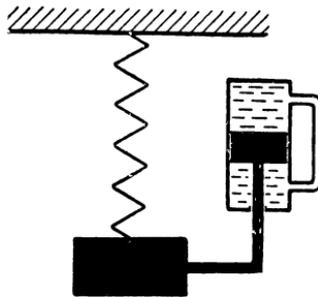


Рис. 7.

ной линией на рис. 3, т. е. периодической (синусоидально-косинусоидальной) функцией, умноженной на функцию, которую мы на рис. 3 изобразили пунктиром.

Если амплитуда затухающих колебаний (или возрастающих, если какая-то сила раскачивает груз) за каждый период уменьшается (или увеличивается) в одно и то же число раз, то наша пунктирная линия изображает собой показательную функцию — это ясно из формулы  $a^{t+\Delta t} = a^t \times a^{\Delta t}$ .

Если  $\Delta t$  — период колебаний, то  $a^{\Delta t}$  как раз и показывает, во сколько раз меняется амплитуда за период. Эта ве-

личина называется *декрементом затухания*. То, что амплитуда действительно меняется в одно и то же число раз за каждый период, можно объяснить следующим образом: пусть за один период амплитуда меняется на 10%, т. е. если в десятом качании она составляла единицу, то в одиннадцатом она будет составлять 0,9 (или 1,1, если мы имеем дело с возрастающими колебаниями).

При неизменном периоде синусоидальных колебаний уменьшение амплитуды повлечет за собой 10-процентное уменьшение скорости, а так как сопротивление пропорционально скорости, то уменьшится и расходование энергии на преодоление сопротивления. Амплитуда следующего качания благодаря этому уменьшится не на 0,1, а на 0,09 (что по-прежнему составляет 10% предыдущей амплитуды!), и амплитуда двенадцатого качания составит  $0,9 - 0,09 = 0,81$ .

Если читателю трудно представить себе возрастающие колебания, пусть он вообразит, что грузик сделан из железа и колебания происходят в магнитном поле. Создающий это поле электромагнит должен быть отрегулирован так, чтобы на груз действовала сила, пропорциональная его скорости и направленная в ту же сторону, что скорость.

Пусть груз и пружина находятся в покое. Любое случайное возмущение — севшая на груз муха или легкий ветерок — создадут крохотную скорость груза, которая послужит причиной возникновения слабенького магнитного поля. Это поле увеличит смещение груза. Из-за большего смещения увеличится скорость при возвратном движении груза, что увеличит во столько же раз напряженность магнитного поля. Колебания начнут расти все быстрее и быстрее, и очень скоро под действием больших амплитуд система просто-напросто разрушится. Помешать этому может лишь то, что при очень больших амплитудах пружина, превзойдя так называемый предел упругости, изменит свою жесткость — коэффициент  $k$ , упоминавшийся выше. Но это уже будет случай нелинейной системы, разбирать который мы сейчас не будем.

Важно понять, что груз на пружине в подобном магнитном поле неустойчив, так как малые случайные возмущения, избавиться от которых невозможно, приводят систему к разрушению, и поэтому такая система существовать не может.

Возмущения же в системе, где груз соединен с поршнем, движущимся с трением, через некоторое время затухнут. Эти возмущения даже не обязательно должны быть малыми — лишь бы они не выводили систему за пределы линейности, т. е. к системе были бы применимы разобранные выше уравнения движения.

Использование поршня в цилиндре с маслом в подобных устройствах называется *демпфированием*, а само устройство, обеспечивающее затухание колебаний, *демпфером*.

## Изображение процессов на фазовой плоскости

На рис. 3 изображен затухающий колебательный процесс, на рис. 4 — процесс колебаний без затухания и без раскачки. В обоих случаях мы откладывали на горизонтальной оси (оси абсцисс) время, а на вертикальной (оси ординат) — отклонения грузика.

Но такой способ изображения колебательных процессов не всегда удобен. Так, например, по графикам рис. 3 и 4 мы могли судить о скорости только косвенно, по «крутизне» графика в каждой данной точке. А для того, чтобы различить незатухающий, затухающий и «раскачивающийся» процессы (последний изображается тем же рис. 3, но с осью времени, направленной влево), нам приходилось сравнивать по величине амплитуды соседних качаний.

Этих неудобств не имеют графики, на которых по горизонтальной оси отложено не время, а скорость. Такие чертежи называются *графиками на фазовой плоскости*. Некоторые их преимущества можно понять даже до вычерчивания. Во-первых, в большинстве реальных процессов колебательного характера, даже продолжающихся очень долго, отклонения и скорости колеблются все время около одной и той же начальной точки. Это значит, что фазовая картина длительного процесса разместится на сравнительно небольшом чертеже. А в координатах «расстояние — время» чертеж такого процесса был бы либо сильно вытянут по горизонтали, либо, если бы мы уменьшили масштаб времени, стал похож на изображение густого гребешка, что сделало бы его неудобочитаемым.

Второе преимущество фазовых картин — что периодические — незатухающие и нераскачивающиеся — процессы изображаются на фазовой плоскости замкнутыми кривыми. Это происходит потому, что повторяющиеся расстояния и скорости изображаются теми же точками, которые изображают предыдущий период процесса.

При затухающих колебаниях положение груза приближается к точке покоя, а скорости приближаются к нулю. Поэтому график затухающих колебаний на фазовой плоскости будет выглядеть, как свивающаяся спираль. Если это ясно, то нетрудно сообразить, что раскручивающаяся спираль будет изображать «раскачивающийся» процесс — процесс колебаний с возрастающими амплитудами.

Процессы, изображенные на рис. 3 и 4 и перерисованные на фазовую плоскость линиями соответствующей толщины, показаны на рис. 8. Здесь внешняя кривая изображает процесс колебаний с возрастающими амплитудами и скоростями.

Из этого рисунка видны и недостатки фазовых изображений: они не показывают число периодов в процессе и продол-

жительность периода. Не видно также направление времени. Из-за этого трудно отличить изображения затухающих процессов от изображений процессов с раскачкой. Впрочем от

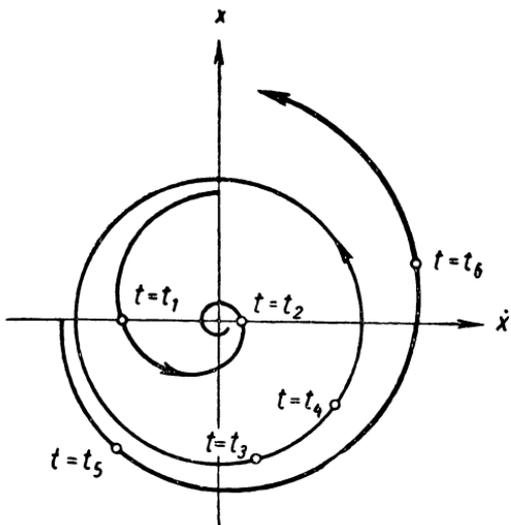


Рис. 8.

этого неудобства можно избавиться, если расставить стрелки, показывающие направление процесса, а при надобности и по-

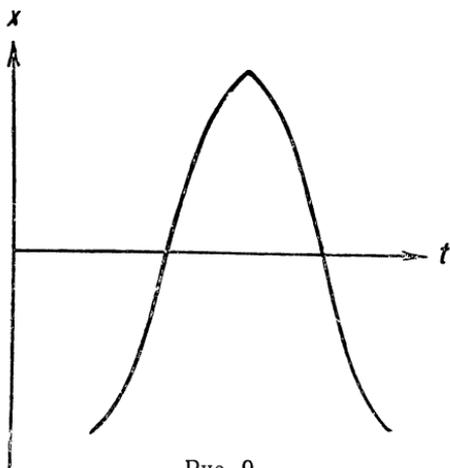


Рис. 9.

метить время при некоторых точках на кривой (см. рис. 8). Такие пометки показывают, в какой момент времени грузик имел данное положение и данную скорость.

Для того, чтобы читатель «набил руку» в работе с фазовыми картинками, ему полезно установить соответствие между кривыми и точками на них на рис. 9, 10, 11, 12, т. е. установить,

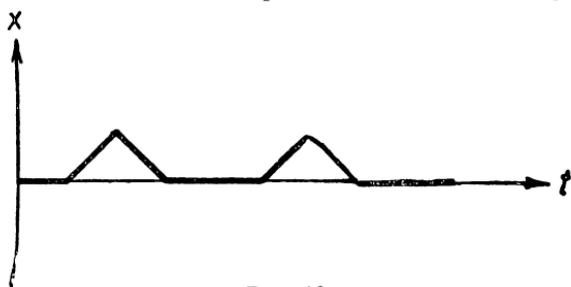


Рис. 10.

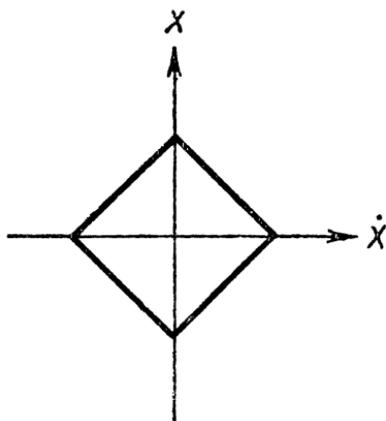


Рис. 11.

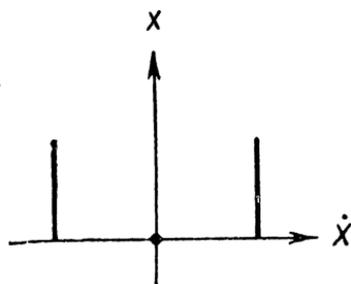


Рис. 12.

какие кривые в координатах  $(x, t)$  и  $(x, \dot{x})$  изображают одинаковые процессы.

### Сравнение разных колебательных движений

Теперь мы можем другими глазами взглянуть на второй и третий из разобранных выше примеров — примеры на космической тематике.

Движение спутника по круговой или не очень вытянутой эллиптической орбите, достаточно удаленной от Земли, для того, чтобы спутник не испытывал сопротивления ее атмосферы, описывается уравнением типа  $\ddot{x} = -x$ , т. е. уравнением, где нет членов, соответствующих ни демпфированию, ни раскачке. Такой спутник до тех пор «ходит» по одной и той же орбите, пока возмущение не переведет его на другую, по которой он будет двигаться до тех пор, пока новое возмущение не переведет его на третью и т. д.

Спутник из третьего примера неустойчив и, значит, долго существовать не может. Всегда найдется случайная сила — возмущение, которое либо, как мы говорили выше, «разорвет» замкнутую траекторию и уведет спутник от Земли, либо, если возмущение направлено в другую сторону, так исказит эллипс, что он будет пересекать поверхность Земли (или плотные слои ее атмосферы). Именно так кончила свое существование советская межпланетная автоматическая станция 1959 г., которая после облета Луны в течение нескольких витков была спутником Земли. Роль возмущения в этом случае играло притяжение Луны. Если бы не было Луны, а эллипс траектории был еще более вытянут, ту же роль сыграло бы притяжение Солнца и планет. Вообще, к неустойчивым траекториям вполне применима поговорка: «было бы болото, а черти найдутся».

Необходимо уметь количественно оценивать, далеко ли находится изучаемая система от границы неустойчивости. Часто это оказывается довольно трудным уже из-за того, что не сразу бывает ясно, чем именно лучше измерять интересующую нас величину, называемую обычно *запасом устойчивости*.

Так, в первом примере запас устойчивости можно измерять превышением растяжения пружины, при котором система теряет право считаться линейной, над наибольшим растяжением, которое предусмотрено условиями эксплуатации данного колебательного устройства, а во втором и третьем примерах запас устойчивости можно измерять либо величиной импульса силы, необходимого для «разрыва» эллиптической траектории, либо размерами и вытянутостью (так называемым «эксцентриситетом») эллипса. Порознь размер эллипса или его вытянутость характеризовать запас устойчивости в этом смысле не могут.

Если изучать устойчивость не траекторий, а времени одного периода процесса, или устойчивость расстояния апогея или перигея спутника от Земли, то может оказаться, что запас устойчивости удобнее измерять какими-то другими параметрами.

Читателю полезно будет продумать, в какой мере движение искусственных спутников Земли из второго и третьего примеров аналогично движению груза на пружине без затухания и без раскачки. Какие параметры в том и в другом процессе играют аналогичную роль? Какие возмущения могут превратить периодические колебания груза в раскачивающиеся? Правильность своих рассуждений или, в крайнем случае, интуитивных представлений можно будет проверить несколько позже, когда мы займемся колебаниями крыла самолета.

Что касается показательной функции и ее роли в решении задач движения, то о ней нужно сделать следующие замечания.

Из всех возможных оснований  $a$  показательной функции  $a^t$  наиболее удобным оказывается такое основание, при котором скорость роста функции  $a^t$  в точности равна значению самой этой функции.

Это значит, что выполняются равенства

$$x = a^t \text{ и } \dot{x} = x.$$

На рис. 13 видно, что при  $a = 1$  показательная функция совсем не растет, т. е. скорость ее роста равна нулю. Чем больше  $a$ , тем быстрее растет показательная функция  $a^t$  (при  $a < 1$  она даже убывает). Значит, найдется такое основание  $a$ , при котором требование  $\dot{x} = x$  выполняется. Можно доказать (мы этого делать не будем), что это имеет место при  $a \approx 2,7183$ .

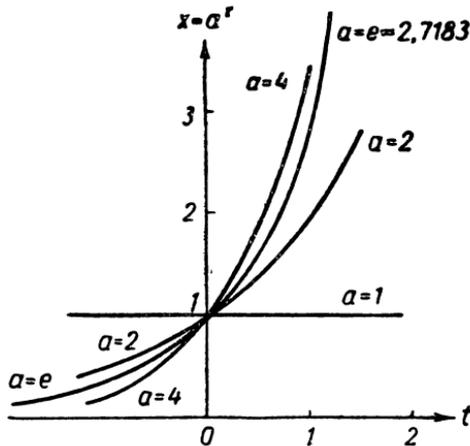


Рис. 13.

Точное значение этого числа, не выражающегося в виде конечной дроби, принято обозначать буквой  $e$  — первой буквой фамилии великого математика XVIII века Леонарда Эйлера. Это число из-за ряда его замечательных свойств часто используют математики.

Мы уже говорили в связи с рис. 3 и 4, что колебательный процесс записывается в виде произведения показательной функции на сумму синуса и косинуса, т. е. в виде

$$x = Ae^{rt} (\sin \omega t + \cos \omega t)$$

(в более сложных случаях может встретиться сумма таких выражений с разными  $A$ ,  $r$  и  $\omega$ ).

Вглядевшись в это выражение, мы увидим, что  $A$  характеризует начальную амплитуду процесса, а  $\omega$  — частоту колебаний. В нашем примере  $\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{m}}$ , т. е. зависит только от

массы груза и жесткости пружины. Чтобы проверить это, нужно решить уравнение на стр. 11, в котором  $k \neq 1$  и  $m \neq 1$ .

Величина  $r$ , стоящая в показателе степени, характеризует степень затухания или раскачивания процесса, причем процесс не обязательно колебательного. Ведь  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , где  $\pi \approx 3,14$  — известное из школьного курса отношение длины окружности к ее диаметру, а  $T$  — период колебаний. Если колебаний нет, то период можно считать бесконечным ( $T = \infty$ ), и тогда частота  $\omega$  действительно равна нулю. При  $\omega = 0$  выражение в скобках в последней формуле равно единице.

Если же  $\omega \neq 0$ , т. е. процесс колебательный, то выражение в скобках не может быть больше 2 или меньше  $-2$  (так как синус и косинус не бывают больше 1 или меньше  $-1$ ), а в действительности изменяется даже в еще более узких пределах. Важно, что характер колебательного процесса *существенно* зависит только от коэффициента  $r$  в показателе степени. Ведь с течением времени ( $t$  растет) выражение в скобках снова и снова повторяет одни и те же значения. Зато множитель  $e^{rt}$  с ростом  $t$  будет изменяться только в одном направлении. Если  $r < 0$ , то с течением времени  $e^{rt}$ , а с ним и все выражение для  $x$ , будет становиться все меньше и меньше, и процесс окажется затухающим. Зато при  $r > 0$  величина отклонения  $x$ , а вместе с нею скорости  $\dot{x}$  и ускорения  $\ddot{x}$  будут неограниченно расти и рано или поздно объект разрушится. При этом под разрушением можно понимать любое следствие процесса неограниченного роста.

Если, наконец,  $r = 0$ , то, как и всякое другое число в нулевой степени,  $e^{rt} = 1$  и колебания не будут ни затухать, ни раскачиваться. Но этот случай чреват опасностями. Ведь если  $r = 0$  или очень близко к 0, то достаточно малому возмущению подействовать на величины, определяющие  $r$  (а обычно на  $r$  влияют многие элементы и параметры процесса), чтобы  $r$  стало больше 0 и амплитуды колебаний начали неограниченно возрастать.

## **УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЕЙ**

### **Устойчивость траектории и ориентация тела**

Наблюдали ли вы когда-нибудь движение на пруду плота, управляемого неумелым человеком? Такой плот не только движется зигзагами, он даже вращается во время движения.

А вот человек, впервые в жизни взявший весла на греб-

ной лодке, справляется со своей задачей значительно лучше. В чем же дело? Да в том, что сама форма лодки помогает ей двигаться вперед именно носом, а как только какая-то возмущающая сила повернет лодку даже на небольшой угол, так сейчас же давление движущегося потока на выступивший вперед борт повернет лодку в правильное положение.

Мы не случайно сказали, что поток движется. Пустая лодка, привязанная за нос или за корму к бакену на реке, никогда не стоит поперек течения. Движущаяся по озеру или любому стоячему водоему лодка испытывает такое же давление воды, как неподвижная относительно берегов лодка на реке. Причина этого в том, что в обоих случаях лодка движется относительно воды или, что то же самое, вода — относительно лодки. Это свойство относительности движения позволяет считать движущееся тело неподвижным, а среду, в которой оно движется, рассматривать как «набегающую» на тело со скоростью, с которой происходит реальное перемещение тела относительно этой среды. Такое рассмотрение очень удобно и постоянно применяется в авиации, к которой мы сейчас и перейдем.

Предварительно укажем, что, если киль лодки или вертикальное оперение самолета сместить вперед, то точка приложения равнодействующей сил давления потока тоже сместится вперед. Если эта точка окажется впереди центра тяжести лодки (или самолета), то давление будет увеличивать, а не демпфировать случайные отклонения оси движущегося тела от направления потока, и оно будет стремиться стать осью поперек потока. Такая склонность к боковой неустойчивости делает лодку или самолет непригодными как средство транспорта. Поэтому центр давления на всех возможных режимах<sup>1</sup> движения должен быть сзади центра тяжести. Однако чем дальше он будет сдвинут назад, тем слабее будут действовать рули, призванные изменять траекторию движения по воле экипажа. Ведь отклонение руля — это сознательно приложенное возмущение. Дальше мы скажем об этом подробнее.

Авиационные примеры интереснее потому, что самолет может перемещаться в трех направлениях и поворачиваться относительно трех осей<sup>2</sup>, т. е. обладает большей свободой движений, чем тела, движущиеся по поверхности земли или воды.

Мы будем говорить о самолете, не затрагивая особенности

---

<sup>1</sup> Оговорка о различных режимах особенно важна для самолетов, где центр давления существенно различен на разных скоростях и высотах полета.

<sup>2</sup> Мы имеем здесь в виду, что любое движение можно представлять себе как сумму одновременных упомянутых шести движений, точно так же, как хождение по диагонали комнаты можно описать как одновременное перемещение относительно двух взаимно перпендикулярных стен.

его аэродинамики. Поэтому наши рассуждения будут несколько упрощены, но зато применимы к любым телам, способным совершать пространственное движение.

В горизонтальном полете самолет движется вперед под действием силы тяги двигателя. Случайные толчки вбок не могут существенно исказить траекторию, так как сопротивление воздуха большой боковой поверхности самолета (это главным образом фюзеляж и вертикальное оперение) и, значит, демпфирование достаточно велики. Это, естественно, не мешает сносу самолета, летящего поперек ветра, точно такому же, как снос лодки, движущейся поперек реки,— и лодка, и самолет увлекаются средой и движутся как части этой перемещающейся среды.

Очень большие по занимаемой площади вертикальные потоки воздуха, естественно, существовать не могут, и быстро пересекающий их самолет не успевает приобрести под действием этих потоков большую скорость вверх или вниз. Сопротивление воздуха в дальнейшем быстро затормозит вертикальное движение самолета. Здесь главную роль будет играть сопротивление большой площади крыла. Быстрое прохождение вертикальных потоков воздуха, ощущаемое как «болтанка», подобно толчкам при поездке по неровной дороге, но как и ухаб на дороге, не может сказаться на направлении движения.

Скорость установившегося горизонтального полета определяется условием равенства силы тяги двигателя и силы сопротивления воздуха. При увеличении скорости сила сопротивления также увеличивается. Поэтому при случайном увеличении скорости сопротивление становится больше силы тяги двигателя, и, следовательно, самолет тормозится.

Аналогичное рассуждение для случайного уменьшения скорости помогает нам понять, почему скорость горизонтального полета самолета устойчива при возмущениях атмосферного происхождения.

А что обеспечивает сохранение скорости при возмущениях силы тяги двигателя? Нижеследующее объяснение в некоторой мере относится, наряду с изложенным в предыдущем абзаце, и к возмущениям атмосферного характера.

Подъемная сила, уравнивающая в горизонтальном полете силу тяжести, тем больше, чем больше плотность среды<sup>1</sup> и скорость полета. При кратковременном увеличении скорости и неизменном угле между крылом и набегающим потоком — величина этого угла, называемого углом атаки, также влияет на величину подъемной силы — подъемная сила, оказавшись

<sup>1</sup> Именно то, что плотность воды в 800 раз больше плотности воздуха на уровне моря и в 2500 раз больше, чем на высоте 10 км, позволяет создавать суда на подводных крыльях, эффективных при скоростях, намного меньше самолетных.

больше силы тяжести, вызовет увеличение высоты полета. Но с увеличением высоты увеличивается потенциальная энергия, а по закону сохранения энергии<sup>1</sup> уменьшается на равную величину энергия кинетическая, т. е. уменьшается скорость. Рассуждение для случая уменьшившейся скорости читатель, конечно, может сделать самостоятельно.

Так как с увеличением высоты уменьшается плотность воздуха, а значит, и пропорциональная ей подъемная сила, читателю также нетрудно убедиться в том, что для поддержания постоянной высоты горизонтального полета вмешательство летчика не требуется. Читателю полезно будет подумать и о возможности полетов в фантастической среде, где сопротивление после превышения некоторой скорости начинает с дальнейшим ростом скорости уменьшаться.

А теперь попробуем понять, почему самолет не приходит в беспорядочное вращение под действием случайных возмущений.

Представим себе, что какое-то возмущение поворачивает самолет относительно его поперечной оси. Поскольку мы стремимся создавать самолеты, которые будут сопротивляться такому вращению, т. е. обладать устойчивостью угла атаки, очевидно, нужно, чтобы на самолете мгновенно возникали силы, поворачивающие его обратно. Ясно, что такими силами могут быть аэродинамические силы, вообще заметно меняющиеся при изменении угла атаки.

Установившийся горизонтальный полет самолета всегда происходит при таких значениях угла атаки, при которых подъемная сила увеличивается, если увеличивается угол атаки<sup>2</sup>. Значит, нужно обеспечить, чтобы добавочная подъемная сила при возросшем угле атаки поворачивала самолет носом вниз (на пикирование). А для этого нужно, чтобы центр тяжести самолета, относительно которого и происходит вращение, был расположен впереди линии действия этой добавочной подъемной силы. При случайном опускании носа уменьшение подъемной силы (а уменьшение это направлено вниз), также приложенное сзади центра тяжести, повернет нос снова вверх (авиаторы называют такое вращение вращением на кабрирование). Чем больше смещен вперед центр тяжести самолета, тем более устойчив самолет, тем больше его «запас устойчивости» и тем быстрее затухают колебания самолета относительно поперечной оси.

Однако извечное правило, что все хорошо в меру, и здесь остается в силе. Если центр тяжести будет очень сильно смещен вперед, то целенаправленное потребное возмущение,

---

<sup>1</sup> Энергия, сообщаемая телу возмущением, пренебрежимо мала.

<sup>2</sup> Если бы это было не так, то самолет вообще был бы неустойчив при любом положении центра тяжести, влияние которого рассматривается несколькими строками ниже. Причина этого изложена на стр. 25.

создаваемое летчиком для изменения траектории полета, может оказаться слишком большим, т. е. потребовать от летчика чрезмерно больших физических усилий для пилотирования, в данном случае для отклонения рулей высоты, с помощью которых и создаются нужные возмущающие траекторию силы.

Мы видим, таким образом, частное проявление общего правила: чем более устойчив процесс, тем больших усилий требует управление им от исполнительных органов управляющего процессом человека или механизма. Если же процесс устойчив, но запас устойчивости мал, то более высокие требования предъявляются к точности системы управления. На самолете это проявляется в том, что при малом запасе устойчивости летчик небольшим (а потому, возможно, случайным) усилием может значительно изменить угол атаки и вывести самолет на очень большую перегрузку. Это представляет собой значительную опасность — самолет может свалиться в штопор или разрушиться под действием чрезвычайно больших сил, возникающих при перегрузке. Большие изменения перегрузки доставляют, кроме того, неприятные физиологические ощущения членам экипажа и пассажирам.

Этот случай особенно интересен тем, что движение самолета происходит под действием двух различных возмущений. Увеличение угла атаки сдвигает подъемную силу вперед (причины этого факта, изучаемого аэродинамикой, мы здесь разбирать не будем) и этим способствует дальнейшему росту кабрирования. Начиная с некоторого критического угла атаки, подъемная сила уменьшается и самолет начинает снижаться, появляется дополнительный воздушный поток снизу вверх, из-за чего угол атаки еще более растет. Но в этот момент под действием какого-то возмущения, а мы уже знаем, что такое всегда найдется, одно крыло будет снижаться чуть быстрее другого. Так как на нем угол атаки окажется больше, то подъемная сила будет меньше, это крыло будет опускаться еще быстрее, угол атаки станет еще больше, подъемная сила еще меньше; дальнейшее малоприятное протекание процесса понятно. Один вид неустойчивости вызвал появление второго.

Рассматривать подробно причины, по которым самолет не вращается в полете вокруг вертикали, мы не будем. Это потребовало бы довольно громоздких (пространных и пространственных) рассуждений, а принципиальная методическая часть осталась бы той же самой. Проблема устойчивости самолета относительно продольной оси рассмотрена в параграфе «Реверс».

### **Устойчивость и управляемость**

С явлением устойчивости всевозможных состояний, движений и процессов весьма тесно связано другое свойство, ко-

торое в определенном смысле следует считать ему симметричным или сопряженным.

Это свойство — управляемость. Мы уже кратко упоминали об этом на стр. 24—25. Под управляемостью мы понимаем степень или количественную меру способности движения (процесса) реагировать на внешние воздействия. В число этих внешних воздействий следует включить и целенаправленные, сознательные действия, призванные изменить в желаемом направлении состояние, движение или процесс.

Никакое отклонение руля неподвижного корабля не в состоянии повернуть корабль потому, что управляющий орган — руль — работает, т. е. создает управляющее воздействие, только в том случае, если есть не равная нулю скорость корабля относительно воды.

Движущийся с большой скоростью по горизонтальной плоскости автомобиль нельзя повернуть с малым радиусом разворота. Радиус разворота современных скоростных самолетов составляет многие километры. Самонаводящаяся ракета, догоняя стремящийся «увернуться» самолет, должна (для прямого попадания) быть способной совершать весьма резкие маневры, т. е. иметь высокую управляемость и быть рассчитанной на большие перегрузки. По этой же причине матадор способен спастись от разъяренного быка, который превосходит его в скорости, но не может преодолеть большую инерцию своего поступательно движущегося тела, т. е. уступает матадору в маневренности.

Из сказанного ясно, что требования к системе управления любым объектом тем больше, чем более маневренным должен быть объект и чем большим запасом устойчивости он обладал в момент поступления управляющего воздействия. Во многих случаях эти требования распространяются не только на систему управления объектом, но и на сам объект. Так, для повышения маневренности ракеты, т. е. управляемости ее по траектории и скорости, она должна не только обладать большими по площади рулями и большими возможными углами отклонения рулей, но и быть достаточно прочной, чтобы не разрушаться при больших перегрузках, обладать высокими аэродинамическими характеристиками для полета в более широком диапазоне углов атаки, достаточной мощностью, точностью и быстродействием рулевых моторов и т. п.

### **Система управления и управляемый объект**

Очень важно, что управляющие возмущения в определенных условиях сами способны вызвать незатухающие или даже возрастающие колебания управляемой системы. Как это про-

исходит, мы рассмотрим на примере автоматического управления полетом.

Реальные устройства управления полетом и выполняемые ими функции очень сложны. Мы упростим их до такой степени, чтобы выявлялись только нужные нам черты этих явлений. Начав с предельно простейшего, мы затем несколько усложним поставленную перед автоматом задачу. Сразу же оговорим следующее очевидное обстоятельство. Более трудные задачи требуют усложнения конструкции управляющего автомата. Отдельные блоки этого автомата сами подвергаются управляющим воздействиям со стороны управляющих устройств «высших» ступеней, а значит, и сами управляющие системы можно рассматривать с точки зрения их устойчивости и управляемости. В сложных современных многоступенчатых системах управления зачастую возникает на некоторых режимах неустойчивость или неуправляемость в работе тех или иных блоков. Борьба с этими явлениями требует дальнейшего усложнения устройств, а это усложнение само может вызвать новые явления того же типа, с которыми оно призвано было бороться. Без общей теории управления с этими лавинообразно нарастающими затруднениями не справиться<sup>1</sup>. И такая теория за последние годы действительно возникла и быстро развивается.

Обратим также внимание на то, что простейшим видом неуправляемости является нечувствительность или низкая чувствительность устройств, не позволяющая им воспринимать слабые сигналы — возмущения. В механических устройствах это люфт и пробуксовывание, в разговоре — минимальная громкость, которую воспринимает собеседник. Читателям, знакомым с понятием «порога возбуждения», это ясно. Не знакомые с этим понятием теперь имеют о нем примерное представление.

Впрочем, нам пора перейти непосредственно к задаче управления движением.

### **Управление траекторией**

Пусть «глупый» автомат устроен так, что отклоняет руль самолета-снаряда на угол, пропорциональный углу ошибки по курсу, и «держит» руль до тех пор, пока ошибка не станет

---

<sup>1</sup> Лавинообразные процессы развиваются обычно в ситуациях с малым запасом устойчивости. Быть может, лавинообразное увеличение научной и технической деятельности за последнее двадцатилетие было вызвано тем, что в «режиме» общественной жизни XX века «старая» наука и техника «потеряли устойчивость»? Быть может, старые, «классические» методы перестали давать удовлетворяющие общество ответы и общество, «управляя» наукой и техникой, сообщило им такие «возмущения», которые перевели их на качественно новую ступень развития? Автор думает именно так.

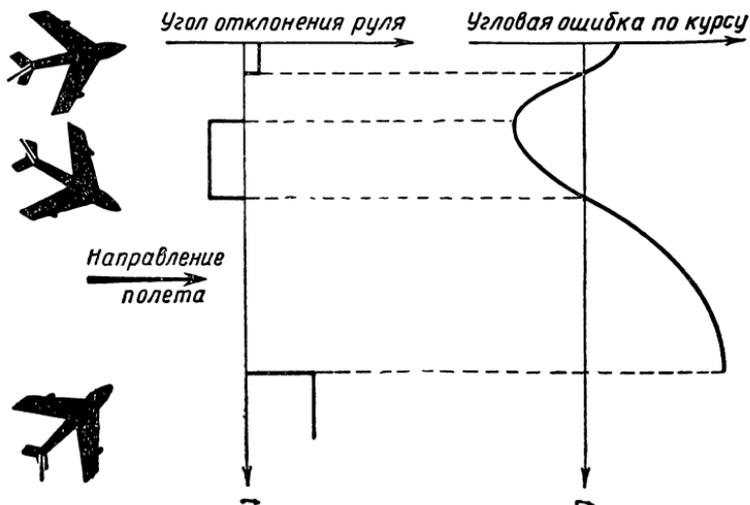


Рис. 14.

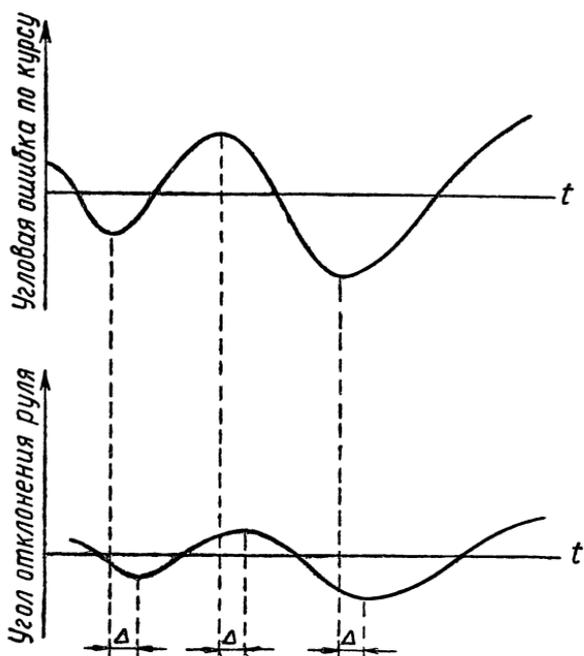


Рис. 15.

равной нулю. Но в момент, когда ошибка равна нулю, самолет продолжает поворачиваться по инерции, несмотря на то, что руль направления возвращен в нейтральное положение. Пусть автомат отклоняет руль в момент, когда угловая скорость равна нулю, т. е. когда угловая ошибка максимальна. Этот момент наступит (раньше или позже — в зависимости от того, велико или невелико демпфирование воздуха), если только равнодействующая сил давления остается приложенной сзади центра тяжести, и руль отклонится, снова возвращая самолет на правильный курс. Если первое отклонение руля «забросило» самолет на больший угол, чем та угловая ошибка, которая была первопричиной отклонения руля, то второе отклонение руля будет большим, чем первое, и приведет к «забрасыванию» самолета-снаряда на большую угловую ошибку, чем первая ошибка, вызвавшая срабатывание руля. Дальнейшее ясно из рассмотрения рис. 14.

Можно представить себе более «умный» или, вернее, «менее глупый» автомат, который отклоняет руль на угол, пропорциональный углу ошибки по курсу не максимальному, а имеющему место в данный момент времени (с некоторым неизбежным запаздыванием, вызванным временем, в течение которого проходят сигналы и срабатывают устройства системы управления). Характер движения виден из рис. 15.

Если запаздывание  $\Delta$  равно (точно или приблизительно) половине периода колебаний, то отклонение руля будет не уменьшать, а увеличивать курсовую ошибку, и «раскачка» самолета-снаряда может происходить очень быстро. Как это явление выглядило на фазовой плоскости, видно из рис. 16.

То же, конечно, может быть и в случае автомата с запаздыванием, отклоняющего руль скачкообразно (см. рис. 14).

Очевидно, что «умный» автомат должен возвращать руль в нейтральное положение раньше, чем ошибка уменьшится до нуля, т. е. работать с некоторым «предвидением». Для этого достаточно возвращать руль в нейтральное положение, когда ошибка, *уменьшаясь*, проходит какую-то наперед заданную величину, скажем,  $3^\circ$ . Еще более умный автомат должен учитывать не только угловую ошибку, но и угловую скорость и величину демпфирования воздуха, зависящую от высоты и скорости полета (так как при малой угловой ошибке и большой угловой скорости самолет-снаряд «проскочит» правильное по курсу положение раньше, чем будет погашена угловая скорость).

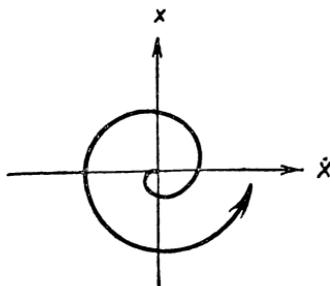


Рис. 16.

## В ПРЕДДВЕРИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

### Устойчивость сжатых элементов конструкции

Можете ли вы сломать деревянный карандаш, надавливая на него рукой с торца? Ясно, что это удастся немногим. Однако сломать тонкую деревянную линейку, даже довольно широкую, например, рейшину, вам будет нетрудно. Но ведь площадь торца, на которую распределяется сжимающая сила, у рейшины и у карандаша примерно одинакова, а следовательно, одинаковым получается и *давление*<sup>1</sup>.

«Дело не в давлении, — скажете вы, — ведь линейка гнулась, перед тем как сломаться, а карандаш — поди, согни!»

Верно. Если фанерный лист поставить в узкую щель, то он не сломается даже при довольно большом давлении. Не сломается потому, что не согнется (рис. 17).

Мы вправе сделать вывод, что различие состоит в том, что карандаш лучше сохраняет свою форму, чем фанера, которая гнется даже под действием собственного веса, если ее прислонить к стене.

Ясно, что любую конструкцию можно считать достаточно прочной только в том случае, если ее элементы в процессе работы, под действием максимально возможных в условиях эксплуатации этой конструкции сил, не теряют свою форму, или, точнее говоря, деформации должны быть не настолько велики, чтобы существенно изменить характер восприятия конструктивными элементами действующих сил.

Увеличивая силу, сжимающую линейку или какой-либо стержень, можно заметить, что при слабом сжатии кратковременно приложенная поперечная сила вызывает более или менее быстро затухающие колебания стержня, а при более сильном сжатии даже небольшая поперечная сила вызывает быстро возрастающий изгиб, заканчивающийся разрушением стержня.

Легко сообразить, что существует такая величина сжимающей силы, при которой изогнутый стержень не восстановит свою форму после прекращения действия поперечной силы. Эту величину сжимающей силы называют критической ( $P_{кр}$ ). Ее небольшого превышения достаточно для разрушения стержня. Таким образом, условием работоспособности конструкций является *устойчивость* формы входящих в нее элементов.

---

<sup>1</sup> Напомним, что давление — это сила, приходящаяся на единицу площади.

Если гнущийся элемент после некоторой деформации встречает дополнительную опору или, деформируясь, «уходит» от сжимающей силы, которая по каким-либо причинам не может за ним следовать, то разрушение конструкции может не наступить, но сжатый элемент в работе при этом участвует не полностью или совсем не участвует (рис. 18 и 19, на которых исследуется восприятие давления двухсоткилограммового бревна).



Рис. 17.

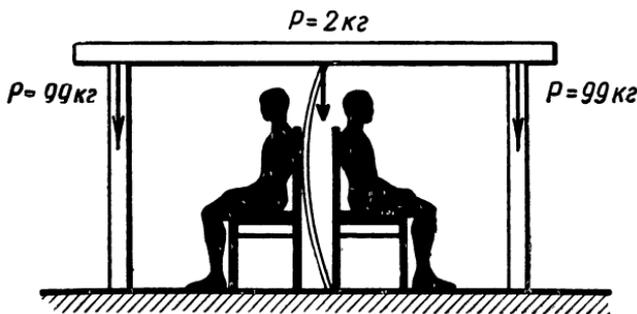


Рис. 18.

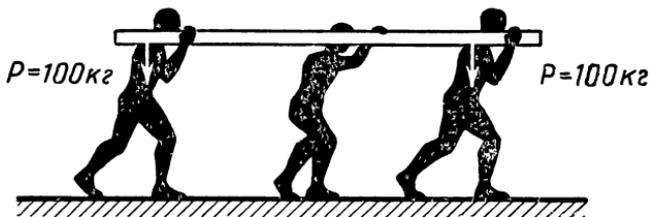


Рис. 19.

Если средний «носильщик» на рис. 19 согнется («потеряет форму»), то он может никакой, или почти никакой, доли веса бревна на свое плечо не принимать. Подобный же случай показан на рис. 18. Пока средняя опора (рейка) не потеряла устойчивости, она может воспринимать и большую нагрузку (в пределах до  $P_{кр}$ ). Поэтому и подбирать ее надо такой жесткости, чтобы на нее приходилась сила  $P$ , несколько меньшая, чем  $P_{кр}$ . Величина  $\frac{P_{кр} - P}{P_{кр}}$  характеризует ее запас устойчивости.

Более двухсот лет тому назад великий математик Леонард Эйлер, уже упоминавшийся нами по другому поводу на стр. 20, вывел формулу для определения величины критической силы. Приводить ее здесь нет необходимости, но полезно отметить, что формула подтверждает интуитивно ясное и экспериментально проверенное явление: чем длиннее стержень, тем меньше  $P_{кр}$ . При этом  $P_{кр}$  обратно пропорциональна не длине стержня, а квадрату длины: критическая сила для вдвое более длинного стержня уменьшается в 4 раза, а для удлиненного десятикратно уменьшается в сто раз. Теория устойчивости сжатых элементов конструкций далеко не исчерпывается результатом Эйлера, так как он применим для довольно узкого круга задач. Несмотря на то, что этой задачей занимался еще Леонардо да Винчи, она до сих пор разработана весьма недостаточно по сравнению с тем, чего требует инженерная практика. Поэтому эксперимент остался до настоящего времени одним из основных методов исследования.

Аналогом управляемости в этом случае оказывается способность стержня под действием какой-либо боковой силы изогнуться, т. е. потерять прямолинейную форму. Такая «управляемость», очевидно, тем больше, чем длиннее стержень и больше сжимающая его сила, и тем меньше, чем жестче стержень. Так как жесткость может быть различной для различных направлений поперечной силы<sup>1</sup>, а способность воспринимать сжимающую нагрузку сильно зависит от того, встретит ли стержень (и если встретит, то с какой именно стрелой прогиба) вспомогательную опору (см. рис. 18), то «управлять» формой стержня можно, используя эти величины: сжимающую и поперечную силу, жесткость и положение вспомогательных опор.

Если жесткость стержня одинакова во всех направлениях и сжимающая сила направлена строго по его оси, то предсказать направление изгиба без вмешательства *искусственной* боковой силы невозможно; *случайная* сила, несомненно, появится, но и направление ее окажется, конечно, случайным.

В задачах строительной механики пользоваться приведенным здесь понятием управляемости неудобно. Поэтому пользуются понятием устойчивости и понятием запаса устойчивости, который выбирается, исходя из конкретных обстоятельств.

Творениями рук и ума человека управляет, если понимать слово «управление» в широком смысле, не только человек. Управляющие состояниями или движениями воздействия оказывает вся среда, в которой работает аппарат, прибор или машина. Это же, конечно, относится и к человеку. Рабочая инструкция, накопленный опыт и смекалка тоже появляются в результате общения со средой. В число управляющих фак-

---

<sup>1</sup> Изогнуть ученическую линейку в ее плоскости, конечно, невозможно.

торов могут входить и, как правило, входят свойства самого управляемого объекта. Примером этого может служить та самая жесткость, о которой мы только что говорили. Жесткость конструкции самолета в сочетании со скоростью его полета является определяющей для двух важных задач авиации. Это так называемые проблемы флаттера и реверса.

### Флаттер

В 1938 г. французские военно-воздушные силы, заинтересованные в создании пикирующих бомбардировщиков, решили использовать для летных испытаний устаревший самолет-разведчик L-210, до этого благополучно летавший со скоростью не более 260 км/час.

В первом же пикировании, как и ожидалось, самолет значительно превысил эту скорость и... развалился в воздухе, чего конечно, не ждали. Расследование, произведенное с участием спасшегося на парашюте летчика, показало следующее:

1. В момент начала катастрофы летчик почувствовал резкие толчки ручки управления и увидел сильные колебания крыльев.

2. Колеблющееся крыло отломилось книзу (не правда ли, это странно: ведь подъемная сила, возрастающая с ростом скорости, действует вверх, и уж если она ломает крыло, то должна была бы отломить его кверху).

3. Центр тяжести крыла находился значительно позади оси кручения, т. е. позади такой линии в крыле, что проходящая через нее нагрузка изгибает крыло, не скручивая его.

При сходных обстоятельствах погиб и другой самолет, который, правда, совершал полет с обычной скоростью.

Расследование показало, что перед полетом был отремонтирован элерон<sup>1</sup>. Вдоль его задней кромки приклепали стальную полосу. В результате такого ремонта центр тяжести элерона заметно сместился назад.

Сейчас мы имеем возможность точно восстановить картину катастрофы. Небольшие случайные толчки — возмущения — изгибали крыло. Подвешенный на своей оси вращения элерон отставал из-за инерции расположенного сзади оси груза. При изгибе крыла вверх элерон отклонялся вниз, а при изгибе вниз задняя кромка элерона была отклонена кверху. Так как сопротивление конструкции и демпфирование воздуха тормозили изгиб крыла, то к моменту, когда крыло достигало крайнего положения — верхнего или нижнего — и скорость его изгиба равнялась нулю, элерон догонял крыло, и восстанавливалась исходная форма.

<sup>1</sup> Элероны — это отклоняемые по воле летчика участки крыла. Обычно их располагают у задней кромки крыла; об их назначении говорится на стр. 35.

В ту четверть периода колебаний, когда упругие силы возвращали крыло, *ускоряя* его, к исходному неизогнутому положению, элерон опять отставал от крыла. Формы колеблющегося около средней линии крыла показаны на рис. 20. Рим-

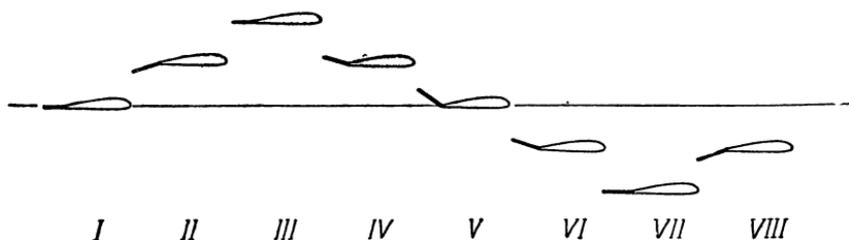


Рис. 20.

ские цифры показывают последовательность изменения этих форм. Такие формы создают аэродинамическую силу, ускоряющую колебания крыла. В начале полета скорость была невелика. Поэтому упругие и демпфирующие силы были больше аэродинамических, и случайно возникавшие колебания быстро затухали (вернитесь к рис. 3 и внутренней кривой на рис. 8). Период таких колебаний обычно составляет десятые или сотые доли секунды.

Но вот летчик увеличил скорость. Раскачивающие крыло аэродинамические силы, пропорциональные, как мы знаем, квадрату скорости, стали больше сил, гасящих колебания. За доли секунды крыло, изгибаясь все сильнее, как это показано на рис. 16, переломилось!

Мы рассмотрели одну из многих возможных форм флаттера. Борьба с флаттером не прекращается. При проектировании новых самолетов десятки ломают голову над поисками таких сочетаний форм, жесткостей и распределений грузов по самолету, при которых *критическая скорость* флаттера будет с достаточным запасом превышать максимальную эксплуатационную скорость создаваемого самолета. Читатель, надо надеяться, понимает, что при критической скорости флаттера колебания изображаются рис. 4 и замкнутой кривой на рис. 8.

## Реверс

Слово «реверсирование» означает изменение направления движения на обратное (например — задний ход автомобиля, холостой ход ползуна строгального станка).

Пусть летчик ведет самолет прямолинейно и горизонтально, т. е. не меняя высоту полета. Среди прочих возмущений встречаются и кренящие, т. е. такие, которые поворачивают самолет относительно его продольной оси. Чтобы выравнять пло-

скость крыльев по горизонту, летчик поворачивает баранку штурвала. Штурвал соединен с вращающимися на оси частицами крыла — уже знакомыми нам элеронами, обозначенными цифрой 1 на рис. 21.



Рис. 21.

При повороте штурвала один элерон опускается, другой — поднимается. Воздушный поток давит на элероны, стремясь вернуть их «на место», но летчик «держит» их. При этом подъемная сила крыла с опущенным элероном увеличивается, а с поднятым — уменьшается, что вызывает крен самолета. Этот крен, возникающий по воле летчика, «гасит» крен, вызванный возмущением. Летчик с помощью элеронов может и по своему желанию создать крен и даже вращение самолета вокруг его продольной оси.

Поток воздуха давит на элерон тем сильнее, чем больше скорость полета. Казалось бы, что всегда на большей скорости для создания вращения с одним и тем же угловым ускорением нужны будут меньшие отклонения элерона.

Так оно и происходит... но не всегда. Бывает, — сразу скажем, к сожалению! — что с увеличением скорости влияние элеронов на вращение самолета становится все более «вялым», на какой-то скорости наступает потеря эффективности элеронов, т. е. становится невозможным парировать действие возмущенных вращений или сознательно кренить самолет. На еще большей скорости может возникнуть крен, противоположный желаемому. Все это не только неприятно, но и просто опасно, особенно для летчика не самой высокой квалификации. В чем же дело?

А в том, что крыло не является абсолютно жестким. Оно может не только гнуться (те из вас, кто летал на больших пассажирских лайнерах, наверное, заметили, как гнутся в полете их крылья). При соответствующих условиях крыло может также и скручиваться.

Именно такие условия возникают при отклонении элеронов. Аэродинамическое давление на элерон и прилегающий участок крыла стремится закручивать крыло. Сделать это нелегко, крыло не резиновый шланг, оно обладает большой *крутильной жесткостью*. Но эта жесткость — свойство самой кон-

струкции; она не зависит от скорости полета. А вот аэродинамическое давление с ростом скорости растет. В результате на больших скоростях закручивание крыльев становится заметным.

Летчик опускает элерон, чтобы увеличить подъемную силу крыла. Но аэродинамическое давление на опущенный элерон закручивает крыло и притом так, что угол атаки уменьшается. Но с уменьшением угла атаки уменьшается и подъемная сила.

Летчик поднимает элерон, чтобы уменьшить подъемную силу. Но крыло закручивается так, что подъемная сила растет. И чем выше скорость — тем больше действие упругой закрутки крыла гасит действие элеронов. Эффективность элеронов падает, потом становится равной нулю, а при дальнейшем повышении скорости возникает крен, противоположный ожидаемому. Это и есть реверс элеронов, который способен вызвать незатухающее вращение самолета.

В реверсе очень ярко проявляется двойственность, симметричность понятий устойчивости и управляемости.

Если рассматривать самолет, систему его управления и летчика как одно целое, то явление реверса представляется нам как явление *неустойчивого* полета. Рассматривая летчика и систему управления как внешнее воздействие, возмущающее вращательное движение самолета, мы видим в том же явлении полет *неуправляемый*.

Подводя итоги, полезно заметить, что если бы идеальные самолеты летали в идеальной атмосфере, мы никогда не встретились бы с проблемой флаттера. Увы! Бесчисленное множество возмущений в атмосфере, а также «возмущений» в изготовлении конструкции самолета, в движениях частей его моторов, в движениях экипажа вынуждают нас заботиться не о ликвидации возмущений, — это практически невозможно, — а о том, чтобы действие возмущений не приводило к незатухающим колебаниям частей самолета.

Если бы, кроме этого, нас устраивал один только идеальный прямолинейный полет, мы никогда не столкнулись бы и с явлением реверса.

### **Дивергенция**

В заключение этого раздела рассмотрим неустойчивое состояние шляпы, срываемой ветром с головы. Ветер создает над выпуклостью шляпы разрежение воздуха такое же, как на верхней поверхности крыла самолета. Это разрежение составляет значительную часть подъемной силы. Возможно, ветер давит и на поля шляпы снизу, но пока ее вес и играющее в данном случае роль жесткости трение о голову превышают давление ветра и создаваемую ветром подъемную силу, шляпа остается на месте.

С увеличением силы ветра поля начинают подрагивать. Быть может, это флаттер шляпы? От вибрации шляпа начинает прилегать к голове менее плотно и какая-то струйка воздуха проникает в глубь шляпы. Увеличившееся давление изнутри приподнимает шляпу, попадающий в нее поток воздуха давит на большую площадь, и шляпа сама поворачивается так, что уносящая ее сила растет, а «жесткость» связи с головой уменьшается.

Представим себе самолет, у которого подъемная сила на крыле приложена впереди его оси кручения; силы на носовой части фюзеляжа направлены вниз, а на хвостовой части и оперении — вверх. Если крутильная жесткость крыла мала, то крыло поворачивается относительно фюзеляжа так, что «откручивающаяся» его от фюзеляжа сила растет, т. е. крыло *деформируется в сторону, способствующую развитию сил, создающих эту деформацию*. Подобное явление, носящее название *дивергенции*, очень напоминает то, что в предыдущем абзаце происходило со шляпой.

То отличие, что жесткость крыла не меняется при изменении скорости, конечно, не является существенным.

## УСТОЙЧИВОСТЬ КЛИМАТА И ПОГОДЫ

### Единство законов природы

Чем более высокую форму движения мы изучаем, тем труднее ее математическое описание. Каждая «вышестоящая» форма движения материи, подчиняясь законам, действительным для тех более простых движений, которые участвуют в более сложном, привносит свои специфические законы. Большая сложность этих законов усложняет точное описание процессов. Так, например, в живой природе соблюдаются и полностью сохраняют свою силу законы механики, физики и химии. Однако знания законов этих наук недостаточно для полного описания процессов, протекающих в живом организме и уж тем более во всей живой природе.

Вспоминая слова К. Маркса о том, что каждая отрасль знания является наукой постольку, поскольку она пользуется математическими методами, мы видим, что в XX веке особенно многие разделы знания стали на путь настоящего научного развития.

Не следует, однако, думать, что привлечение математики для изучения более высоких форм движения материи позволяет в каждом случае дать такое же количественное описание

процесса, которое осуществимо и является вполне правильным для более простых движений. Можно довольно точно предсказать время, через которое разрушится известная механическая система, подвергающаяся заранее известным силовым воздействиям. Но более трудными и менее точными являются попытки предсказать время, через которое перегорит электрическая лампочка, если даже известны законы изменения силы тока и напряжения; предсказать время выпадения дождя и количество осадков, даже если известна погода в интересующем нас месте и его окрестностях; предсказать продолжительность жизни растения при заданном режиме его питания, окружающей температуры, освещения и т. д.

Важно понимать, что целью наук, изучающих более высокоорганизованную природу, не является поиск ответов на подобные вопросы. Задаваться такими вопросами и требовать на них точного количественного ответа означало бы вносить в науку механистическую вульгаризацию.

Цель привлечения математики — более точное познание не только количественных, но и качественных закономерностей и особенностей изучаемых явлений. Именно здесь можно наблюдать, как изменение количественной меры в причинах создает новое качество в следствиях.

И вот тут мы обнаруживаем, что некоторые качества явления устойчивости сохраняются в весьма сложных процессах движения высокоорганизованной материи, хотя иногда и завуалированы другими ее свойствами. При этом невозможно не заметить, что и сама устойчивость процессов носит другой, иногда значительно более сложный характер.

### **Температура и атмосферное давление**

Физическая география и метеорология, изучая климат и погоду, используют математические методы. Здесь мы эти методы почти не затрагиваем, но все же стремимся к тому, чтобы и при отсутствии вычислений изложение пронизывал «математический дух».

Что мы понимаем под словами «неустойчивая погода»? Эти слова означают, что погода часто и резко меняется.

Общезвестно, что в приморских местностях температура более устойчива, чем во внутриконтинентальных районах. Объясняется это тем, что удельная теплоемкость<sup>1</sup> воды значительно больше, чем суши. Медленно нагреваясь и медленно остывая, море играет роль демпфера температурных колеба-

---

<sup>1</sup> Напомним, что удельной теплоемкостью называется количество тепла, потребное для нагревания единицы массы вещества на 1°С.

ний, так как отдает тепло суше тогда, когда она холоднее воды, и отбирает у нее тепло, когда суша нагрета больше, чем море.

Скорость распространения тепла по известному закону Ньютона пропорциональна разности температур. Но знания этого закона совершенно недостаточно для предсказания погоды.

Прежде всего, несмотря на внешнюю простоту закона теплопроводности, математическое решение задачи для берегов неправильной формы (т. е. той, которую они имеют в действительности) является крайне трудным. Подобные задачи, называемые краевыми (или граничными), служат предметом весьма сложного раздела математической физики.

Но этого еще мало. На погоду влияют, существенно искажая влияние теплопроводности, многие другие причины. Есть среди них постоянные — рельеф местности и растительность. Есть причины, меняющиеся по определенному закону, который часто носит периодический характер. Таковы, например, угол наклона солнечных лучей, меняющийся со временем года и временем суток, или уровень приливов и отливов, также колеблющийся по сложному закону<sup>1</sup>.

Наконец, есть такие причины, как ветер, отражающая способность поверхности, облачность, давление и влажность воздуха. Эти причины не могут быть точно предсказаны, так как сами зависят от искомой температуры и еще от многих и многих других явлений.

Помимо моря и суши, в передаче тепла участвует еще и третья среда — воздух. Из-за различной теплоемкости воды и суши его массы нагреваются и охлаждаются по-разному. Так, после захода солнца суша, а следовательно, и воздух над ней, охлаждаются гораздо быстрее, чем море и воздух над ним. Разница в температурах воздуха создает разницу в плотностях, и воздушные массы начинают перемещаться.

Так возникают ветры, дующие с суши на море или с моря на сушу в разные часы суток (так называемые бризы). Аналогичное явление при смене времен года порождает сезонные ветры — муссоны.

Для Западной Европы, например, у главного «демпфера» температурных колебаний — Атлантического океана — есть довольно сильный помощник. Это сезонные ветры, *северо-западные* летом и *юго-западные* зимой.

А вот в Японии климат и погода, которые «демпфирует» Тихий океан, подобного «помощника» не имеют. Напротив, сложное сочетание воздействий теплого течения Куросио на юге, холодных вод Охотского моря на севере и периодических

<sup>1</sup> Перемещение береговой линии малб в сравнении с размерами Земли. Поэтому уровень приливов влияет не столько на климат, сколько на микроклимат узкой прибрежной полосы.

муссонных ветров и течений делают климат и погоду Японии менее устойчивыми.

Влияние окружающего пространства проявляется в демпфировании не только резких отклонений температуры, но и резких отклонений атмосферного давления. Поэтому атмосферное давление редко выходит за пределы 985—1025 миллибар<sup>1</sup>. Давление выше 1070 или ниже 900 миллибар — явление весьма редкое.

Проведем на карте линии, соединяющие пункты, в которых атмосферное давление одинаково. Такие линии называются *изобарами*. Там, где изобары лежат ближе друг к другу, т. е. там, где перепады давления больше, демпфирование соседних областей, стремящееся уравнять давление, сильнее. Это демпфирование выражается, как легко сообразить, силой ветра. Практика подтверждает правильность этого вывода.

Правда, направление ветра не вполне совпадает с тем, которого можно было бы ожидать на первый взгляд. *Ветер не перпендикулярен к изобаре*. Причина этого — вращение Земли, но рассматривать механизм отклонения ветров мы здесь не будем.

### Управление климатом

После этого краткого разговора об устойчивости климата естественно перейти к вопросам его управляемости.

Нынешнее научное состояние этих вопросов характеризуется многочисленными большими и малыми вопросительными знаками. Но ряд полезных рассуждений мы все же сможем провести<sup>2</sup>.

В последние годы достигнуты определенные успехи в управлении микроклиматом. Время от времени то тут, то там удается предотвратить град, уничтожить облачность над аэродромом и т. п. Не говоря уже о том, что экономический эффект этих работ пока еще довольно мал — расходы по предотвращению града близки к экономии от его предотвращения, или, что то же, к убыткам от его выпадения, — отметим, что сами достигнутые успехи весьма неустойчивы. Удача часто без видимых причин сменяется неудачей, а это заставляет нас признать, что управляют погодой пока еще не столько

---

<sup>1</sup> 1 бар — это давление в 10 ньютон на квадратный сантиметр, или около 1 кг/см<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> В данном случае мы руководствуемся рекомендацией американского математика Томаса Л. Саати: «Для развития творческих способностей человека важно развивать у него с раннего возраста привычку терпеливо и независимо мыслить... Способность выделить главное может быть выработана, если чаще пытаться решать различные проблемы, не обращая внимания на их сложность». В приведенной цитате автор считает все абсолютно правильным и каждое слово важным.

ученые, сколько неподвластные нам силы. Можно полагать, что эта неподвластность состоит не в том, что эти силы велики, а скорее в том, что они пока недостаточно изучены. Это очень важно потому, что энергетические затраты на управление могут составлять ничтожную долю от управляемой энергии!

Большее влияние на климат оказывают крупные сооружения рук человеческих. Особенно это заметно при строительстве плотин и водохранилищ. Нельзя, однако, не признать, что в некоторых случаях побочные результаты такого строительства предвидеть не удавалось. Изменения в водном режиме местности, состоянии растительного и животного мира иногда резко отличались от предсказаний, сделанных специалистами.

Бывало, к сожалению, что пруды, выкопанные для разведения рыбы, становились рассадниками малярии; осушение болот вело к гибели близлежащих лесов и пересыханию колодцев в окрестных деревнях. Загрязнение водоемов сточными водами и нефтяной пленкой на поверхности сказывается на флоре и фауне района, на режиме испарения воды и состоянии прибрежных лесов.

Природа сурово карает за забвение ее единства! Разделение природы по типам явлений не встречается нигде, кроме учебников. Но в учебниках раздробление явлений природы по разным отраслям знания имеет методологический характер, облегчающий систематическое познание законов окружающего нас мира. Слишком часто эта причина забывается, и весьма относительная независимость наук представляется нам как абсолютная независимость разных явлений природы. Диалектический метод научного познания в качестве одной из своих основных черт указывает на признание всеобщей связи и взаимозависимости явлений реального мира.

Нас, однако, интересует сейчас вопрос о глобальной устойчивости, т. е. об устойчивости климата в масштабах земного шара в целом. Это особенно интересно в связи с частыми сенсационными и противоречивыми сообщениями печати. За последние годы были сообщения и о скором перемещении Европы на экватор, и о том, что, если льды Антарктиды (или Северного полярного бассейна) начнут таять, то этот процесс примет лавинообразный характер и океан затопит многие приморские районы. Автор знаком с «авторитетной теткой», имеющей «авторитетных знакомых», которые всякую плохую погоду в 1950 г. объясняли Куйбышевской ГЭС (тогда еще не построенной!), в 1955 — испытаниями водородных бомб, а после 1961 г. — полетами космонавтов. Есть подозрение, что такие знакомые есть и у читателя, в связи с чем автор приносит ему свои соболезнования.

---

<sup>1</sup> Ракета на Луну отправляется от нажатия кнопки; можно также вспомнить Пушкина: «Вдруг слабым манием руки на русских двинул он полки».

Попытаемся вышелушить из подобных сообщений и рассуждений то рациональное, что в них есть.

Будучи прозрачной для лучей видимого света, атмосфера почти непрозрачна для невидимых тепловых лучей. Приходящее днем солнечное тепло не успевает поэтому за ночь улечься в космос. Разница температур дня и ночи оказывается не слишком большой. Эта устойчивость суточной температуры — одна из важных причин, благоприятствующих существованию жизни на Земле. Отсутствие или малая плотность атмосферы на какой-либо планете — достаточно надежное доказательство того, что на этой планете жизнь в формах, сходных с земными, невозможна.

У снега и льда отражающая способность намного больше, чем у водной поверхности, которая поглощает значительную часть тепла, приносимого солнечными лучами. Не только вода, но и любое темное вещество поглощает больше тепла, чем светлое. По этой причине летнее платье обычно шьют белым, а посыпанный сажей снег тает быстрее белого.

В этом смысле правы те, кто предлагает, зачернив поверхность ледников Памира, ускорить их таяние и за счет полученной воды увеличить орошение среднеазиатских полей. Но каковы будут вторичные следствия такого орошения? Пока никто этого предсказать не берется.

Есть и более смелые проекты растопить подобным образом льды Северного Ледовитого океана. Весьма возможно, что если бы это удалось, то поглощение водной гладью Арктики намного большего количества тепла, чем ныне, воспрепятствовало бы образованию новых льдов.

Гораздо сложнее вопрос о последствиях, к которым это может привести. Увеличение поглощения тепла повысило бы температуру не только в Арктике, но и на всем земном шаре. Это привело бы к увеличению испарения океанов. Увеличение облачности над землей вызвало бы охлаждение, связанное со значительной отражающей способностью облаков, возвращающих около 80% приходящей на Землю энергии солнечного излучения в космическое пространство. Не исключено, что такое демпфирующее действие испарения не позволило бы уничтожить льды полностью и привело бы лишь к незначительному потеплению Арктики с непредвидимым изменением климата в других местностях.

Однако, по мнению английского ученого доктора Стэгга, само испарение демпфировалось бы другим процессом. Уменьшение разницы температур между тропиками и полярными областями привело бы к ослаблению ветров, которые связаны с расширением и подъемом масс теплого воздуха вверх и, следовательно, с изменением атмосферного давления. Но ветры играют значительную роль в парообразовании. Ослабление ветров неизбежно приведет к уменьшению облач-

ности, роль которой мы только что рассмотрели. (Тем, кто считает это влияние незначительным, полезно вспомнить, что в холодный ветреный день лужи высыхают быстрее, чем в теплый безветренный.)

Последние рассуждения заставляют нас поставить по меньшей мере два важных вопроса.

1. В состоянии ли мы вообще существенно повлиять имеющимися в распоряжении человечества средствами на климат земного шара или его крупных областей?

Океаны совместно с атмосферой играют роль регулятора климата и обеспечивают на Земле некоторую среднюю температуру с приемлемыми для человека, хотя и значительными отклонениями. Современная наука не в состоянии ответить пока на вопрос о запасе устойчивости климата земного шара. Если этот запас устойчивости велик, то мы пока не в состоянии существенно повлиять на климат. То, что этот запас устойчивости не слишком мал, следует из того, что естественные возмущения за последние тысячелетия не смогли нарушить естественное равновесие в природе.

Отсутствие точной и надежной теории, объясняющей причины возникновения и конца великого оледенения, заставляет нас быть осторожными: запас устойчивости, быть может, не так уж и велик? В руках человека появились силы, которые могут по своему влиянию на климат соперничать с естественными возмущениями. По мнению многих специалистов, однократное понижение средней температуры в атмосфере Земли привело бы к новому оледенению. А средняя температура покрытой льдом Земли из-за увеличения отражательной способности была бы близка к  $-90^{\circ}\text{C}$ .

Выхлопные газы ракет могут влиять на поток коротковолнового излучения Солнца, которое участвует в образовании озона в стратосфере. Наличие же озона влияет на ветры на малых высотах — ближе к поверхности Земли. Не следует думать, что выхлопные газы ракет в масштабах атмосферы Земли играют ничтожную роль. Ведь ракеты выбрасывают их на больших высотах, где воздух настолько разрежен, что относительное количество выхлопных газов нельзя считать ничтожным по сравнению с массой воздуха.

Гипотезу о том, что сжигаемое на Земле топливо создает в верхней атмосфере дополнительную оболочку газов, пропускающих солнечное тепло, но препятствующих отдаче тепла Землей в космос, нельзя считать ни подтвержденной, ни опровергнутой. Однако, если она верна, то Земле грозит общее потепление. То, что такое потепление может оказаться лавинообразным, следует из сказанного выше.

Слово «грозит» связано со вторым вопросом, который мы хотели поставить.

2. Хотя человечество и не очень удовлетворено окружаю-

щей его природой, у нас нет оснований чрезмерно на нее жаловаться. Ведь на путях естественного отбора человек возник и развивался так, чтобы наилучшим образом соответствовать окружающей его природе. Человек приспособлен к жизни в довольно узком диапазоне температур, давлений и составов воздуха, окружающих его растений и животных и многих других факторов. Замечательная система приспособления организма к окружающей среде прекрасно работает в этом диапазоне. Приспособлена ли она к работе в других условиях, по меньшей мере сомнительно. Ведь у нее не было естественных причин для такого приспособления. Поэтому весьма опасен выход за пределы устойчивой работы механизмов, управляющих процессами в человеческом организме и человеческом обществе (человек — безусловно общественное существо, и себе подобные — необходимый компонент его среды).

Наблюдения последних лет показали предположительную связь сердечных заболеваний даже с солнечной активностью, а уж влияние температуры и давления на функции организма общеизвестно.

Вообще знания человека об устойчивости и управляемости процессов в окружающей его среде и в его собственном организме быстро увеличиваются, хотя пока невелики. Из того, что человек в существующей среде устойчиво существует и развивается, нельзя сделать вывод о величине запаса устойчивости по отношению к тем или иным изменениям этой среды.

Достоверно известно, что разного рода тренировки расширяют пределы, в которых человеческий организм способен к устойчивой работе. Однако это относится не ко всем факторам среды. Так, по-видимому, тренировки не могут предотвратить кессонную болезнь, заключающуюся во влиянии на организм газов, растворенных в крови. Кроме того, не следует забывать, что даже тренированные люди проводят в необычных условиях сравнительно непродолжительное время и что почти ничего не известно о влиянии этих необычных условий на наследственность.

Нет сомнения в том, что приспособляемость всего человечества или хотя бы населения некоторых стран к изменившимся условиям среды будет существенно зависеть от *скорости* изменения этих условий. Поручиться же за малый темп изменений в среде современная наука не может.

«Управлять» природой, не изучая последствия подобного «управления», весьма опасно. Такие попытки следует квалифицировать как умственную и моральную неуправляемость при возмущениях со стороны фактов.

Возвратимся ненадолго к явлениям глобального и даже космического масштаба.

## Теплопередача и демпфирование температуры

Весьма грубо роль солнечного нагрева и демпфирования его отдачей тепла в космос можно проиллюстрировать следующим образом.

Примем среднюю температуру поверхности Земли равной  $15^{\circ}\text{C}$ . Если начинать отсчет не от температуры замерзания воды, а от абсолютного нуля, то это составит  $\sim 288^{\circ}\text{K}$ .

Нагрев всех планет имеет своим источником излучение Солнца. Среднее количество приходящего на единицу поверхности планеты тепла обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Зная расстояния Земли и планет от Солнца, мы можем, исходя из этого, попытаться вычислить температуру поверхности любой планеты.

Например, орбита Марса удалена от Солнца в  $\sim 1,52$  раза дальше, чем орбита Земли. Казалось бы, что абсолютная температура на поверхности Марса должна составлять  $288^{\circ} \frac{1}{(1,52)^2} \approx 124^{\circ}$ .

В действительности же температуры поверхности планет, определенные астрофизическими методами, намного ближе к температуре поверхности Земли, чем определяемые только что указанным способом. Это видно из следующей таблицы, числовые значения в которой даны по абсолютной шкале и округлены.

Температура	Меркурий	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран
Замеренная	690	240	135	120	90
Вычисленная	1920	124	11	3	1

И вычисленная и замеренная температуры отличаются от земной в одну и ту же сторону. Значит, *направление* температурных отличий наш метод дает правильное.

Однако отсчитанная от абсолютного нуля относительная (т. е. взятая в процентах) ошибка вычислений тем больше, чем больше температура планеты отличается от земной. Теперь ясен и недостаток нашего метода: он не учитывает отдачи планетой тепла в окружающее космическое пространство. Чем горячее поверхность планеты, тем больше тепла отдает она в космос. Именно это демпфирующее влияние космоса сближает температуры планет между собой и делает предложенный нами метод расчета чисто иллюстративным, но непригодным для практического использования.

## Устойчивость погоды

Посвятим несколько слов вещам более близким и доступным для непосредственного исследования читателем. Метеорологические наблюдения вообще представляют собой очень благодарный материал для изучения явлений устойчивости.

Для этого нужно лишь не только регулярно фиксировать погоду — температуру, количество и вид осадков, давление, направление и силу ветра и т. п., но и обрабатывать собранные сведения. Так, если известна температура воздуха в одно и то же время суток за много дней подряд, то устойчивость температуры можно определить количественно по формуле

$$a = \frac{\sum \Delta t}{n - 1} .$$

В этой формуле  $\Delta t$  — разность температур двух соседних дней,  $n$  — число дней в исследовавшемся периоде времени. Знак  $\Sigma$  означает, что в числителе стоит сумма всех  $\Delta t$ . Если наблюдения велись в течение  $n$  дней, то число слагаемых в числителе равно  $n - 1$ , и величина  $a$  представляет собой среднюю величину изменений температуры. Чем меньше  $a$ , тем более устойчивая погода была в данном месте в исследованное время.

Эта формула не вполне отвечает сложившемуся у нас представлению об устойчивости погоды. Действительно, если например, в течение месяца по четным числам температура воздуха была  $20^\circ$ , а по нечетным  $18^\circ$ , то температуру следует считать на редкость устойчивой. По указанной формуле мы получим характеристику устойчивости  $a = 2$ . Однако если во все дни месяца температура была ровно  $20^\circ$ , кроме десятого числа, когда она понизилась до  $6^\circ$ , и двадцатого числа, когда стояла  $35$ -градусная жара, мы считать погоду устойчивой не будем, хотя по указанной простейшей формуле опять же  $a = 2$ . Для исправления этого недостатка формулы можно предложить, например, вместо величины  $\Delta t$  брать  $(\Delta t)^2$ . Тогда для месяца, в котором резких колебаний температуры не было,  $a = 4$ , а для месяца с резкими колебаниями  $a = 29$ . Разница весьма заметная!

Чтобы характеризовать устойчивость погоды не только по температуре, можно подобным же образом обработать измерения влажности воздуха, давления, осадков и т. п.

Читателю, желающему по-настоящему глубоко понять причину, почему для сравнения погоды в разные дни можно применять различные формулы, следует подумать над вопросом: какие два состояния погоды следует считать близкими (похожими), а какие — далекими<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Количественную меру близости состояний можно ввести и для самых различных явлений. Интересующимся этим вопросом рекомендуем доступную и малоподготовленному читателю прекрасно написанную книжку Ю. А. Шрейдера «Что такое расстояние». (Физматгиз, 1963).

При этом наблюдатель может также проверить закон «инерции погоды», состоящий в следующем: если предсказывать, что завтра погода будет такой же, как сегодня, то существенных ошибок будет приблизительно три на каждые 10 предсказаний. В среднем погода довольно устойчива, и это позволяет читателю попробовать конкурировать по точности с бюро прогнозов погоды.

## УСТОЙЧИВОСТЬ В ХИМИИ. ЭНЕРГИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ

### Почему в природе много воды?

Одно из самых распространенных в природе химических соединений — это вода. Молекула воды  $H_2O$  состоит из двух атомов водорода Н и одного атома кислорода О. Гораздо реже мы встречаемся с перекисью водорода. В ее молекуле присутствует «лишний», по сравнению с водой, атом кислорода. А почему, собственно, перекись водорода встречается реже воды? Почему молекулы воды не захватывают имеющийся в воздухе в избытке кислород и не превращаются в молекулы перекиси водорода? И почему обратный процесс превращения перекиси водорода в воду происходит настолько легко, что требуются специальные, довольно строгие условия хранения перекиси водорода? Почему при нарушении этих условий молекула перекиси водорода теряет «лишний» атом кислорода и превращается в обычную воду?

Ответ на эти вопросы заключается в том, что химические реакции, протекающие с выделением энергии, так называемые *экзотермические* реакции, вызвать сравнительно легко, зачастую настолько легко, что очень трудным оказывается их предотвратить. Реакции же противоположного типа, требующие для своего осуществления поступления энергии из окружающей среды, так называемые *эндотермические*, как правило, самопроизвольно не возникают. Это и понятно — получить необходимую для реакции энергию в естественных условиях, без вмешательства человека, обычно неоткуда.

Очень часто подача энергии из окружающей среды осуществляется нагревом. Роль температуры в осуществимости и скорости химических реакций становится понятной, если вспомнить, что скорость молекул вещества растет с ростом температуры. Быстро перемещающаяся частица быстрее встретится с «напарницей», с которой она может прореагировать; именно поэтому устойчивость многих химических веществ зависит от температуры. Иногда нагреву может помочь или заменить его механическое перемешивание реаки-

рующих веществ. Оно также может повысить шансы на встречу реагирующих частиц.

Разница между экзо- и эндотермической реакциями подобна разнице между шариками, лежащими на бугорке и в ямке (рис. 22). Любого незначительного толчка достаточно, чтобы шарик, находившийся на бугорке в неустойчивом равновесии, скатился вниз. В противоположность этому толчки, выбрасывающие шарик, находящийся в устойчивом равновесии в ямке, т. е. толчки, сообщающие шарика энергии, необходимы для подъема из ямки, в природе встречаются не часто.



Рис. 22.

Бесчисленное множество примеров подтверждает этот общий закон природы. Для возникновения озона  $O_3$  из атмосферного кислорода  $O_2$  требуется затрата энергии. В естественных условиях на перевод кислорода в трехатомное состояние расходуется часть энергии грозовых разрядов. После грозового дождя мы иногда улавливаем слабый запах озона, который быстро исчезает, так как озон, выделяя полученную энергию, «скатывается обратно в ямку» двухатомного состояния. Искусственно концентрированный озон при ударах взрывается и, выделяя избыток энергии, также возвращается в двухатомное состояние. Точно так же и атомарный кислород  $O$  возникает в естественных условиях в верхних слоях атмосферы за счет энергии Солнца.

Однако два атома кислорода при встрече тотчас же объединяются в устойчивую молекулу  $O_2$ , выделяя полученную энергию. Положение с кислородом в природе схематически показывает рис. 23.

Положение с водой, разделенными молекулами водорода и кислорода и перекисью водорода показывает рис. 24. Для подъема со дна ямки на большую высоту нужна большая энергия. Поэтому из рис. 24 ясно, что водород и кислород в принципе могут в естественных условиях перейти в перекись водорода, а обратный процесс невозможен. Однако, в конечном счете, и смесь водорода с кислородом, и перекись водорода превратятся в обычную воду.

Для рис. 23 аналогичное рассуждение читатель может провести самостоятельно.

Закон сохранения энергии говорит, что для осуществления

эндотермической реакции нужно затратить то же количество энергии, которое выделяется при обратной экзотермической реакции.

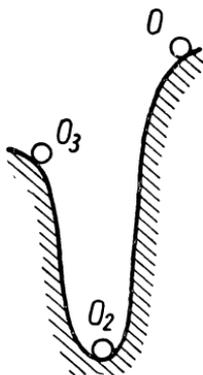


Рис. 23.

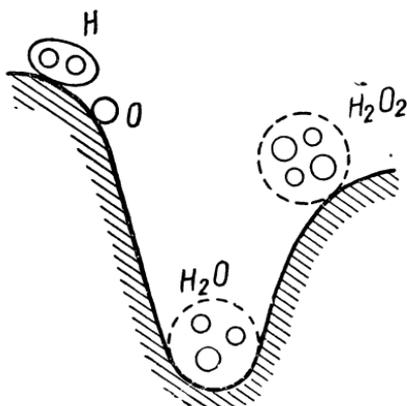


Рис. 24.

Таким образом, мы очень естественно вводим понятие устойчивости химических веществ. «Глубина ямки», как читатель уже догадался, характеризует запас устойчивости; для этого ее надо измерять в единицах энергии.

### Устойчивость растворов и скорость химических реакций

Наблюдать неустойчивое состояние вещества легче всего, пожалуй, в растворах. В горячей воде или другом растворителе можно растворить большее количество вещества, скажем, сернистого натрия, чем это удалось бы сделать в холодном растворителе. Следовательно, при охлаждении насыщенный раствор становится пересыщенным. Иногда его удастся хранить довольно долго. Но достаточно бросить в пересыщенный раствор крупницу сернистого натрия или хотя бы его встряхнуть, чтобы началось бурное образование кристаллов и выпадение излишка растворенного вещества. Величина этого излишка зависит от разности двух температур: той, при которой был получен насыщенный раствор, и той, при которой происходит кристаллизация. В результате кристаллизации в растворенном состоянии останется такое количество вещества, которое максимально можно растворить при данной температуре. Такой раствор, как известно, называется насыщенным.

Брошенная в раствор крупница сыграла свою управляющую процессом роль. Многие химические процессы удается осуществить только при участии таких «управляющих» веществ. Многие другие процессы с помощью этих веществ удается

ускорить или замедлить. В первом случае такие вещества называют катализаторами, во втором — ингибиторами.

Слова «ускорить» и «замедлить» надо понимать и в их крайних значениях: когда без катализатора реакция вообще не начинается, а ингибитор замедляет скорость реакции до нуля — реакция прекращается.

Аналогия (в определенных пределах!) явлений катализа и демпфирования очевидна.

### Энергия

Лежащий в ямке шарик, будучи выброшен наверх, редко остается лежать на ее краю. Он скатывается в другое углубление, иногда лежащее ниже исходного. (Воспрепятствовать этому может трение.) Точно так же затрата небольшой энергии на начало экзотермической реакции позволяет, используя выделяющуюся в процессе реакции энергию, перевести большее количество вещества на другой, более «глубокий» энергетический уровень. Пример тому — горение. Беспольные потери энергии (на испарение влаги из сырых поленьев, на нагрев окружающего костер воздуха и т. п.) играют роль трения, т. е. демпфируют процесс горения.

В ряде случаев два или даже большее число состояний вещества оказываются устойчивыми и не проявляют видимого стремления перейти в какое-либо одно наиболее устойчивое состояние. Сделать из этого вывод о том, что все эти состояния соответствуют самому низкому возможному энергетическому положению, было бы неверно. Это доказывается тем, что превращение одной формы в другую требует иногда затраты большей энергии.

Правда, обычно, когда реакция превращения началась, вся или часть этой энергии возвращается, т. е. некоторый этап процесса является экзотермическим. Иногда возвращается энергия даже больше затраченной! Однако это, конечно, не опровергает закона сохранения энергии. Примером тому — только что упоминавшееся горение. Убедиться в этом иным способом можно, вспомнив, что, кроме ям, бывают и бугры. (Выкатывание из одной ямы с последующим скатыванием в другую, конечно, можно рассматривать как преодоление бугра.) Начальная энергия нужна для того, чтобы подняться на бугор — это эндотермический этап процесса. Спуск с другой стороны бугра — экзотермический этап — идет с выделением энергии (рис. 25).

Энергия, расходуемая для подъема на вершину энергетического бугра, называется *энергией активации*.

Малые изменения энергии активации существенно влияют на скорость реакции. Это и понятно. Чем выше «бугор», тем меньшее число молекул обладает энергией, достаточной для

его преодоления. Так как большинство молекул обладает энергией, близкой к *средней* энергии молекулы, а число молекул, энергия которых намного больше или намного меньше средней, невелико, то зависимость скорости реакции от энергии

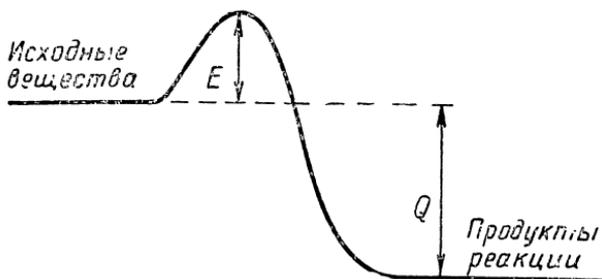


Рис. 25.  $E$  — энергия, расходуемая для подъема на вершину энергетического бугра; ее называют энергией активации. Количество энергии  $Q$  называется тепловым эффектом реакции. Этот рисунок иллюстрирует экзотермическую реакцию, для эндотермической реакции читатель может начертить рисунок самостоятельно.

активации отнюдь не пропорциональная. Грубой аналогией этому обстоятельству может служить следующий пример.

Число прыгунов, способных преодолеть планку, установленную на двухметровой высоте, невелико. Уменьшая высоту планки, мы будем увеличивать число преодолевающих ее сначала медленно (через планку на высоте 180 см перепрыгивают тоже немногие), затем быстрее, а затем опять медленно. Иначе говоря, когда планка будет ниже, скажем, 50 см, ее перепрыгнут почти все прыгуны, то бишь, почти все молекулы реагируют, и дальнейшее уменьшение уровня энергии активации окажется бесполезным облегчением условий. Реакция и без этого протекает взрывообразно, потому что подавляющее большинство молекул преодолевает барьер с «первой попытки».

Преодолеть бугор можно и иначе — прорывая под ним тоннель. Существуют химические вещества, способные и на подобный путь преодоления энергетических препятствий. Вспомним, что получить простоквашу из молока можно либо поставив его в теплое место, либо добавив в молоко закваску. Аналогичные процессы имеют место и при изготовлении вина. Всякого рода дрожжи, закваски способствуют протеканию процессов, которые без их использования требовали бы преодоления энергетических бугров, иногда очень высоких. Создание такого рода «энергетических тоннелей» называется обычно ферментацией. Ферменты — вещества, пробивающие подобные «тоннели», это разновидность упоминавшихся несколько выше катализаторов.

## Диссипация и первая теорема Кельвина

Силы, влияющие на протекание процесса при условии, что они ему противодействуют и по величине пропорциональны скорости процесса, называются *диссипативными*.

Очевидно, что рассмотренное выше демпфирование — сопротивление среды, пропорциональное скорости движения, — есть частный случай диссипации.

Влияние диссипации на устойчивость описывается тремя теоремами, выведенными великим английским физиком XIX века Уильямом Томсоном, известным также под именем лорда Кельвина. Мы изложим здесь смысл этих теорем, не вдаваясь в тонкости их формулировок и тем более в математический аппарат доказательства.

Первая теорема Кельвина гласит: «Если состояние или процесс устойчивы без влияния диссипативных сил, то они остаются устойчивыми и при присоединении этих сил».

Правдоподобность этой теоремы ясна из того, что, если шарик не выкатывается из ямки с полированными стенками, то он и подавно не выкатится из ямки, стенки которой противодействуют выкатыванию трением<sup>1</sup>. Слово «подавно» в данном случае означает, что запас устойчивости в неполированной ямке не меньше, чем в полированной. В то, что эта теорема не только правдоподобна, но и истинна, читателю придется поверить автору на слово. То же относится и ко второй и третьей теоремам<sup>2</sup>.

### О понятии устойчивости и второй теореме Кельвина

Если состояние или процесс обладают тем свойством, что независимо от величины и направления возмущения они через некоторое время мало отличаются от невозмущенного состояния или процесса, то их называют *асимптотически устойчивыми*. То же самое можно выразить другими словами: если установлена мера близости двух состояний или процессов<sup>3</sup> и если, какую бы малую (но не равную нулю) величину  $A$  различия между состояниями или процессами мы ни задали, через какое-то определенное время можно будет поручиться, что *начиная с этого момента при любых* начальных возмущениях<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> Мы продолжаем говорить о выкатывающемся шарике, хотя научная строгость требует различать в этой задаче трение качения от трения скольжения. Делать это мы здесь не будем, так как это не отразится на правильности результатов наших рассуждений.

<sup>2</sup> Недоверчивые могут прочесть книгу Н. Г. Четаева «Устойчивость движения» («Наука», 3-е изд., 1965), требующую от читателя солидной математической подготовки.

<sup>3</sup> См. сноску на стр. 46.

<sup>4</sup> Любых из совокупности рассматриваемых возможных возмущений.

любые два состояния или процесса будут отличаться друг от друга меньше, чем на  $A$ , то такие состояния или процессы называются *асимптотически устойчивыми*. Если не требовать от величины  $A$ , чтобы она могла быть выбрана сколь угодно малой, а ограничиться требованием о том, что два возмущенных состояния в любой момент отличаются друг от друга не больше чем на  $A$ , причем сама величина  $A$  может быть выбрана независимой от времени, то состояние или процесс называются *устойчивыми*.

Автор сознает трудность последнего абзаца и тем не менее настоятельно советует продумать его внимательно и не спеша. И в учении и в жизни пригодится! Ведь много *похожих* формулировок встречается в высшей математике и физике.

Настоящую же книжку можно успешно дочитать и без этого. Впрочем, вернемся ко второй теореме Кельвина. Чтобы сформулировать ее, необходимо предварительно установить, что такое полная и частичная диссипация.

Процесс могут демпфировать многие различные причины. Если в демпфировании участвуют все учитываемые в задаче не зависящие друг от друга причины, то процесс называется процессом с полной диссипацией. В противном случае диссипацию называют частичной. Так, если при движении шарика по плоскости трение ощущается только при движениях в одном направлении, скажем, вперед-назад, а движение вправо-влево происходит без трения, то диссипация частична. То же имеет место в задаче о движении горячего тела по шероховатой во всех направлениях плоскости и о его температуре: если энергия тела расходуется на преодоление трения, но нет передачи тепла в окружающую его среду, или наоборот, если движение происходит без трения, но с теплоотдачей, то диссипация также частична.

Эти примеры показывают, что при точном решении задач диссипация практически всегда бывает полной. Однако во многих случаях незначительные для данной конкретной задачи диссипативные силы можно для простоты не учитывать.

Теперь, усвоив эти необходимые понятия, мы можем сформулировать теорему Кельвина: если состояние или процесс были устойчивы при отсутствии диссипации, то с учетом диссипации, если она полная, состояние или процесс станут асимптотически устойчивы.

Наглядным примером этой теоремы является процесс колебаний груза на пружине с учетом и без учета демпфирования, разобранный нами на стр. 11—13.

Если бы мы раскачивали маятник, способный качаться в двух направлениях: вперед-назад и вправо-влево, но в одном из этих направлений демпфирование отсутствовало при наличии демпфирования в другом, то во втором направлении колебания бы затухали, а в первом сохранялись. Мы имели бы

процесс устойчивых, но не асимптотически устойчивых колебаний, иллюстрирующий значение условия о полной диссипации в формулировке теоремы.

Здесь опять надо напомнить о зависимости понятия «устойчивость» от того, чем измеряется близость двух состояний.

Возьмем два совершенно одинаковых маятника, движущихся без трения, и, отклонив их от положения равновесия на близкие друг другу, но не равные углы, заставим качаться. За счет разницы в начальных отклонениях периоды колебаний маятников будут несколько различны<sup>1</sup>, а амплитуды, ввиду отсутствия трения, равны начальным отклонениям. Благодаря этому процессы будут близки друг к другу, если не обращать внимания на время, т. е. близки в том смысле, что кривые *I* и *II* на рис. 26 имеют почти одинаковые амплитуды. Если же

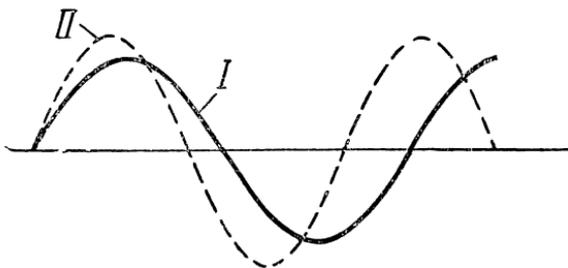


Рис. 26.

сравнивать амплитуды в определенные моменты времени, то мы видим, что существуют интервалы времени, когда маятники находятся в противофазе, т. е. маятник *I* находится в крайнем левом положении в тот момент, когда маятник *II* близок к крайнему правому. Эти интервалы сменяются интервалами времени, когда маятники *I* и *II* движутся близко друг от друга, а затем вновь расходятся. Подобное явление имело место при одновременном полете в 1962 г. советских космонавтов Николаева и Поповича. Их корабли «Восток-3» и «Восток-4», имея все время близкие друг другу апогей и перигей орбит, то сближались, то удалялись друг от друга. С точки зрения определения устойчивости, данного на стр. 53, такие движения нельзя признать устойчивыми. Они неустойчиво зависят от начальных условий, т. е. от начального угла отклонения маятников или от времени одного оборота корабля-спутника вокруг Земли.

<sup>1</sup> Известная из школьного курса физики формула  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$  указывает, что период колебаний маятника  $T$  зависит только от длины маятника  $l$  и ускорения силы тяжести  $g$ , но не зависит от амплитуды. Но эта формула — приближенная. Она вполне справедлива только для исчезающе малых амплитуд.

### Третья теорема Кельвина и неустойчивые состояния

Третья теорема Кельвина утверждает, что, если состояние или процесс неустойчивы без диссипативных сил и если на некотором расстоянии<sup>1</sup>, хотя бы и очень малом, от этого состояния или процесса нет других таких же состояний или процессов, то диссипативные силы не могут превратить это состояние или процесс в устойчивые.

На языке уже привычных нам примеров это значит, что если на вершине бугорка лежит шарик (см. рис. 22), то он скатится при *малейшем* возмущении с бугорка независимо от того, обладает ли поверхность бугорка трением или нет. Здесь мы по-прежнему имеем в виду трение движения — качения или скольжения, но отнюдь не трение покоя.

Однако, как это видно из второго условия теоремы, ее действие не распространяется на бугорки с плоской вершиной. Действительно, сколь угодно малого возмущения достаточно, чтобы шарик скатился либо соскользнул с идеально полированной плоской вершины (рис. 27). Если же плоская верши-



Рис. 27.

на обладает трением, то *очень мало* возмущения уже не хватит, чтобы переместить тело к краю вершины, где оно может скатиться вниз по склону.

Представим себе закупоренный сосуд, в который налито *немного* нелетучей жидкости. При любых возмущениях (толчках) каждая частица жидкости, совершив «путешествие» по сосуду, будет стремиться вернуться к его дну, т. е. к состоянию равновесия, имевшему место до толчка. Такое движение есть, очевидно, асимптотически устойчивое. Если же сосуд вынесен из поля тяжести (например, помещен на космическом корабле, совершающем полет с выключенными двигателями), то движение частиц будет устойчивым в том смысле, что они не могут покинуть сосуд и, следовательно, удалиться от исходного положения на расстояние, превышающее диаметр сосуда. Однако асимптотической устойчивости при этом, очевидно, не будет.

Читателю ясно, что в этом случае под расстоянием понимается расстояние от дна сосуда, а расстояние в плоскости, параллельной дну, во внимание не принимается. Никто не мо-

<sup>1</sup> См. сноску на стр. 46.

жет запретить нам измерять близость частиц именно так, если это удобно для решаемой задачи.

Вернем сосуд на Землю и откроем его. Если мы сообщим сосуду или непосредственно частице жидкости толчок, т. е. возмущение, достаточно большое, чтобы частица покинула сосуд, то она может удалиться как угодно далеко и в этом смысле выйти на неустойчивую траекторию движения. Возвращение ее в сосуд практически невероятно.

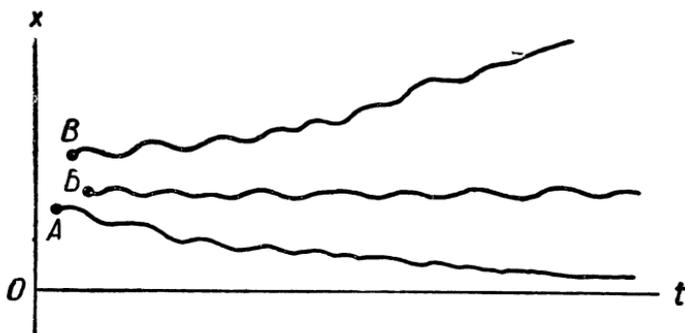


Рис. 28.

Рассмотрим рис. 28. На нем изображены траектории (во времени, а не в пространстве!) частицы, не испытавшей возмущения (ось  $Ot$ ), и частиц, попавших в результате возмуще-

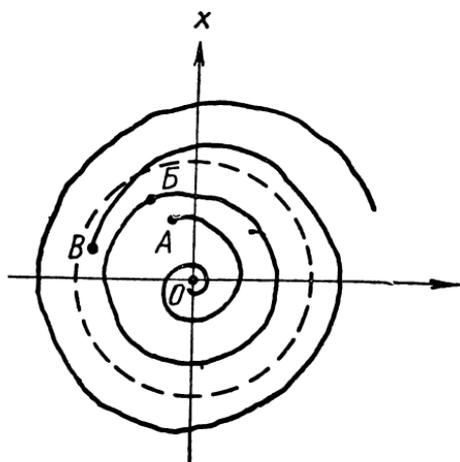


Рис. 29. На рис. 28 ни одно возмущенное движение ни в какой момент времени не совпадает с невозмущенным. А кривые, восходящие из точек  $A$ ,  $B$ ,  $B$  на фазовой плоскости пересекают ось  $x$ ! Значит, начало отсчета и масштаб на этом рисунке отличается от начала отсчета на рис. 28.

ния в точки  $A$ ,  $B$  или  $B$ . Частица, попавшая в точку  $A$ , совершает асимптотически устойчивое движение, попавшая в точку  $B$  — устойчивое, а попавшая в точку  $B$  — неустойчивое. Здесь очень ярко проявляется то обстоятельство, что об устойчивости

и неустойчивости можно говорить, только сравнивая возмущенные движения с движением невозмущенным.

На фазовой плоскости эти же движения будут иметь вид кривых, показанных на рис. 29. Пусть пересечение пунктирной линии соответствует выходу частицы за пределы сосуда. По нашему условию, покинувшая сосуд частица не возвращается, и, значит, траектория любой частицы, отклонившаяся от оси  $Ot$ , либо вовсе не пересекает пунктирную линию, либо пересекает ее только один раз, и притом наружу, из области, ограниченной пунктирной линией. Пунктирная линия разделяет, таким образом, устойчивые и неустойчивые траектории и поэтому называется *сепаратрисой* (от слова «сепарировать» — разделять). Сепаратрисами также называют другие линии, отделяющие различные классы движений.

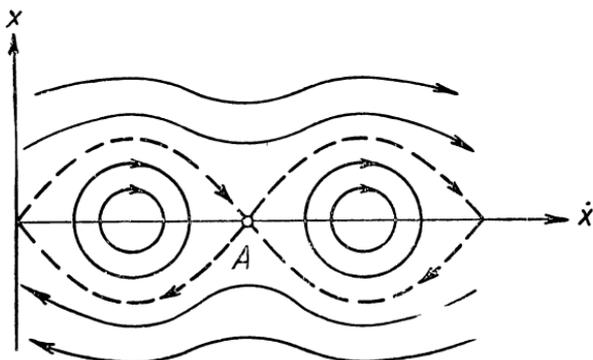


Рис. 30.

Так, на рис. 30 замкнутые сплошные линии представляют собой фазовые траектории колеблющегося без демпфирования маятника, волнообразные линии — фазовые траектории того же маятника, получившего столь сильный толчок, что он начал вращаться вокруг точки подвеса, а показанная пунктиром сепаратриса разделяет эти два класса движений. Сепаратриса в то же время является траекторией такого качания, при котором маятник попадает в неустойчивое положение равновесия — груз над точкой подвеса, — с нулевой скоростью в этом положении. Разветвление сепаратрисы в точке  $A$  соответствует двум возможным дальнейшим движениям — продолжению вращения в том же направлении или возвращению назад по только что пройденному пути. Выбор того или иного пути определяется случайным возмущением, предвидеть которое мы в этой идеализированной задаче не можем, не сомневаясь, однако, в том, что оно обязательно появится.

## Устойчивость и химическая активность

«Полный комплект» восьми электронов на внешней оболочке атомов инертных газов делает их химически весьма устойчивыми. Чтобы преодолеть эту большую устойчивость, нужно, естественно, большое управляющее воздействие. Такое воздействие могут создать наиболее активные элементы — галогены, занимающие седьмой столбец в периодической таблице Менделеева и имеющие лишь семь электронов на внешней оболочке атомов. Стремление захватить восьмой недостающий электрон у них настолько велико, что галогены являются весьма химически активными веществами, легко вступающими в реакции. Поэтому естественно, что первые химические соединения инертных газов удалось получить с наиболее активным элементом — фтором F (активность галогенов падает с ростом их атомного номера). Так как устойчивость инертных газов уменьшается с ростом атомного номера элемента («сцепиться» с электроном, расположенным на более далекой внешней оболочке, слабее притягиваемой ядром атома, все же легче, чем с электроном более близкой к ядру оболочки), то легче всего заставить прореагировать галоген, имеющий малый порядковый номер с инертным газом, имеющим больший номер. Это рассуждение подтверждается практикой.

Этим кратким экскурсом мы и ограничим наше вторжение в область химической активности веществ. Читателю, конечно, ясно, что мы не коснулись многих важных и сложных вопросов этого раздела. Достаточно напомнить хотя бы о способности некоторых веществ проявлять различную валентность в разных соединениях, которые тем не менее оказываются достаточно устойчивыми, чтобы не переходить самопроизвольно в какое-то одно энергетическое состояние. Примерами могут служить сернистый ангидрид  $\text{SO}_2$  и серный ангидрид  $\text{SO}_3$ , сернистоокислый натрий  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  и серноокислый натрий  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , закись железа  $\text{FeO}$  и окись железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , кислоты фосфора  $\text{HPO}_3$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

Заговорив о фосфоре, трудно не упомянуть, что он и вне соединений существует в трех различных формах (это явление называется *аллотропией*). Наиболее устойчива черная форма, наименее устойчива — белая, существует промежуточная форма — красный фосфор.

Изложенное позволяет изобразить энергетическое соотношение нескольких устойчивых форм схемой рис. 31. «Уступы», на которых расположены белый и красный фосфор, символизируют устойчивость этих форм, а малая глубина площадки — малый запас устойчивости.

И последнее замечание. Обычно устойчивыми называют вещества, слабо вступающие в химические реакции. Однако некоторые вещества проявляют столь сильное стремление к

реакции с самыми различными другими веществами, что его не назовешь иначе, как устойчивым стремлением. (Все сказанное можно, конечно, изложить с термином «управляемость».)

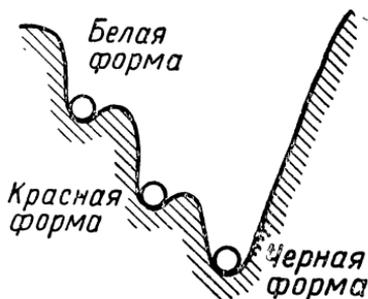


Рис. 31. Устойчивость различных форм фосфора.

Бессмысленно считать это парадоксом или жаловаться, что слово «устойчивость» употребляется в столь многих смыслах, что без пояснений ничего не говорит. Это не парадокс, а диалектика.

## УСТОЙЧИВОСТЬ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

### Природа в роли конструктора

В предыдущих главах мы более или менее подробно останавливались на довольно многих примерах явлений устойчивости и управляемости, относящихся к технике и наукам, лежащим в основе техники.

В последние годы ученые и инженеры в поисках решений вновь возникающих задач или новых, лучших решений старых задач все чаще обращаются к «решениям», найденным живой природой. Это и понятно. Созданные живой природой механизмы — это живые существа. Сложность их невообразима в сравнении с любым творением человека. И при этом в вопросах качества продукции мы также часто еще не можем конкурировать с природой. Какой подъемный кран по габаритам, надежности, коэффициенту полезного действия, межремонтному сроку службы и точности управления сравнится с мышцами руки? Какой насос может конкурировать с сердцем? Какой самолет может взлетать и садиться на площадку, равную по площади колесам его шасси? А именно таковы «аэродромы» птиц, порхающих с ветки на ветку! Какой терморегулятор может десятки лет поддерживать температуру постоянной, саморемонтируясь при отклонениях температуры от заданной? А ведь именно это делает простудившийся живой

организм! Вполне понятно стремление инженеров перенять у природы ее конструкторские способности. Направление научной мысли, изучающей конструктивные решения, найденные природой, и пути их применения в технике, называется *бионикой*<sup>1</sup>.

Совершенно ясно, что бионика не может обходить вопросы устойчивости и управляемости в живом организме. Что касается мыслящей материи, то к *управляемости* под действием естественных возмущений надо добавить *управление* с помощью возмущений — искусственных управляющих сигналов.

Важные и интересные явления устойчивости и управления присутствуют буквально во всех процессах, протекающих в живой природе. Чтобы внести хоть какую-то систему в это множество сложных взаимодействующих и взаимовлияющих явлений, мы рассмотрим их последовательно на разных уровнях организации биологических систем. Для наших целей достаточно будет следующей простой классификации:

1. Молекулярный уровень, на котором изучаются физико-химические процессы.

2. Клеточный уровень, на котором мы сталкиваемся, в частности, с чудесным явлением, состоящим в способности живых механизмов создавать другие механизмы, себе подобные, а зачастую и немножко более совершенные. Путем таких небольших усовершенствований от обезьяноподобных предков произошел человек, а задолго до древней обезьяны в начале этой цепи стояло существо, подобное амебе.

Первый и второй уровни можно рассматривать как единый генетический уровень — уровень, изучающий наследственность, сходство и различие поколений.

3. Уровень организма. На этом уровне хорошо видна произвольность нашей классификации. Ведь амеба, будучи организмом, может быть рассмотрена и как клетка. Однако высшие животные достаточно отличаются от амобы, чтобы иметь отличные от нее свойства, которые стоит рассмотреть отдельно.

4. Некоторые организмы не могут существовать отдельно друг от друга или даже семьями. Свои особенности имеет еще более высокий уровень — уровень группы сосуществующих особей. Если это особи одного вида, то это стадо или стая, а в случае высокой организации — *общество*. Этот термин относят не только к человеку, но и к сложным организациям типа роя пчел, муравейника и т. п. В случае же сосуществования, сожителства разных биологических видов говорят о *симбиозе*. Правда, этот термин используют только для случаев, когда оба сосуществующих вида способствуют процве-

---

<sup>1</sup> Чувствовать себя слишком принижено перед природой все же не следует. Ни одно живое существо не перемещается на колесах, не передает энергию на большие расстояния, ни одна птица не летает на сверхзвуковой скорости. Мы, люди, все-таки кое-что умеем!

танию друг друга. Для отношений стай кошек и мышей этот термин не используют.

Только что упомянутые пчелы также представляют собой пример, демонстрирующий условность используемой классификации. Отдельная пчела почти так же не способна к жизни, как отдельная рука или нога человека. Поэтому некоторые биологи считают более правильной классификацию, признающую, что рой — это единый организм. Независимость отдельной пчелы от роя почти равноценна независимости руки от других органов тела.

Наш разговор будет несколько конспективным, но объем и назначение этой книги не позволяют дать более подробное изложение многих важных вопросов этой области. Их вполне хватило бы для самостоятельной книги. Нужно также помнить, что эта глава посвящена не биологии вообще, а только устойчивости в живой природе.

### **На границе биологии и химии**

Известный французский врач доктор Лабори утверждал, что «жизнь представляет собой непрерывное колебание около состояния равновесия, которое никогда не бывает стойким». Попробуем несколько расшифровать это определение. Для всякого живого организма, даже для достаточно сложной органической молекулы, можно указать некоторые, обычно довольно узкие, пределы окружающих условий, в которых этот организм (или клетка, или молекула) может существовать. При значительных отклонениях температуры, давления, химического состава среды, электрического поля или других условий наступает гибель. Она сопровождается либо превращением живого вещества в неживую — неорганическую материю, либо преобразованием живого вещества в составные части других тканей или органов живой материи. Состояние полного покоя, полного равновесия для живой материи неосуществимо, так как реальный мир полон разнообразных возмущений, действующих на нее.

Отсюда следует, что жизнь можно рассматривать как процесс устойчивого движения, но отнюдь не асимптотически устойчивого. Всякого рода диссипативные силы в самом организме и среде стремятся превратить движение (конечно, не в механическом, а в наиболее общем смысле) в асимптотически устойчивое, но этому препятствует неотъемлемое свойство жизни — обмен веществ. В процессе этого обмена организм получает извне энергию, т. е. организм не представляет собой консервативную систему<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Консервативной называется система, которая не получает энергию извне и не расходует ее вовне; все сказанное на стр. 52 о влиянии диссипации на устойчивость верно, конечно, только для консервативных систем.

Организм, полностью изолированный от среды, под действием диссипативных сил будет стремиться к состоянию устойчивого равновесия. Этот процесс и является умиранием.

Обмен веществ, конечно, не единственное свойство жизни. К некоторым другим важнейшим свойствам мы сейчас и перейдем.

Живая материя способна создавать материю себе подобную. Устойчивость этого свойства является наследственностью — передачей потомкам свойств родителя. Наследственность есть общее свойство живой материи — как человек рождается от людей, так и при делении клетки возникают дочерние клетки, подобные материнской.

Если бы это качество было безусловным, то потомки были бы точной копией родителей и эволюция была бы невозможной. Это заставляет нас признать, что живая материя обладает способностью реагировать на возмущения, изменяться под действием таких возмущений и передавать по наследству качества, приобретенные под действием возмущений.

Такие возмущения называются *мутациями*. Эволюция и представляет собой процесс накопления изменений, происходящих под действием мутаций.

То обстоятельство, что мы видим живую материю прекрасно приспособленной к окружающей среде, есть, конечно, следствие естественного или искусственного отбора. Потомки существ или хотя бы клеток, подвергшихся неблагоприятным мутациям, в более или менее раннем поколении погибали. Это зависело от степени вредности мутации, а вредность мутации можно определить, как степень нарушения приспособления к окружающей среде. Поскольку среда также не абсолютно устойчива и постепенно меняется, то без мутаций жизнь вообще была бы невозможна — точные копии организмов древней жизни не приспособлены к современной физико-химической и биологической среде земного шара. Виды, на которые изменения среды влияют мало, могут существовать дольше — таковы некоторые рыбы, почти не изменившиеся за миллионы лет. Сильно зависящие от изменений среды виды могут развиваться и погибнуть за сравнительно короткий (исторически!) отрезок времени.

Из сказанного ясно, что под мутациями мы понимаем способность к изменчивости на всевозможных уровнях жизни, однако в чисто биологическом аспекте изучение наследственности и мутаций надо, конечно, начинать «снизу» — с молекулярно-клеточного уровня, а затем уже переходить к более сложным составным живым структурам.

Клетка живого организма заполнена особым веществом — цитоплазмой. В цитоплазме находится ядро, содержащее *хромосомы*. Хромосомы в свою очередь содержат *гены*. Все гены хромосомы различны и имеют различные функции. Такими

функциями являются хранение и передача потомству различных наследуемых свойств. Многообразие передаваемых свойств определяет и многочисленность генов. (Обычно под мутациями понимают изменения в гене или хромосоме; выше мы использовали этот термин в несколько более общем смысле, чем обычно.)

Каким образом гены хранят сведения о свойствах, которые надлежит передать потомству? Какой механизм обеспечивает устойчивость «памяти», передающей веками и тысячелетиями одни и те же «сведения» без ошибок? Какой механизм вносит изредка в ген ошибку при копировании информации, ошибку, которая будет передаваться потомкам до гибели всего рода или до тех пор, пока новая ошибка — новая мутация вновь не изменит функцию гена?

Современная наука знает об этом еще очень мало. И все же ксе-что полезное для нашей темы мы сможем из генетики почерпнуть<sup>1</sup>.

Наследственные признаки в клетке формирует специальное вещество, на котором сосредоточено внимание современных биохимиков. Это *дезоксирибонуклеиновая кислота* (сокращенно ДНК), обладающая рядом свойств, дающих ей возможность хранить и передавать наследственные признаки. Важнейшее свойство молекул ДНК — это способность создавать из окружающих химических элементов среды свои точные копии. Этот процесс можно рассматривать как размножение на молекулярном уровне. Возможно, что хранение сведений о наследственных признаках — наследственной информации — в молекулах ДНК осуществляется благодаря способности этих молекул реагировать на физические возмущения.

Какой именно род физических явлений или, что скорее всего, какие их сочетания определяют особые свойства ДНК, мы достоверно еще не знаем. Важно, что молекулы ДНК не только разных видов живой материи, но и разных представителей одного и того же вида различны и своим различием делают возможным сходство потомков именно со своими родителями.

Сказанное сразу же объясняет причину того, что более высокие формы жизни двуполы. Действительно, наследование части признаков от отцовских генов или молекул ДНК и части от материнских дает неизмеримо больший простор естественному отбору признаков, благоприятствующих сохранению и развитию биологического вида, чем отбор благоприятных мутаций лишь по одной линии. Конечно, при двуполом размножении могут быть неудачные сочетания удачных признаков,

---

<sup>1</sup> Для более подробного ознакомления с затронутыми здесь вопросами можно рекомендовать весьма популярную и в то же время написанную на хорошем научном уровне книгу Шарлотты Ауэрбах «Генетика в атомном веке» (Атомиздат, 1959).

но сам факт существования более широкого «ассортимента» позволяет из меньшего числа поколений быстрее отобрать наиболее приспособленные к среде.

Ген, определяющий настолько «неудачный» признак, что его носитель гибнет, называется летальным геном. Гибель носителя обрывает цепь неприспособленных к среде поколений, в результате чего выживают и дают жизнеспособное потомство только приспособленные. Неудачные, но не смертельные гены могут пройти через целый ряд поколений, но в конце концов, после всех страданий, которые они принесут своим носителям, им суждено погибнуть.

Вредные гены возникают в результате вредных мутаций. Чем более высоко организовано существо, тем меньше шансов, что мутация окажется полезной. Это ясно следует из случайности каждой отдельной мутации. Процесс этот подобен случающемуся или ухудшить форму куска железа, а вероятность того, что удар по испорченным часам сместит все «колесики» так, что их ход станет правильнее, слишком мала. Поэтому увеличение числа мутаций под действием радиоактивности вследствие испытаний ядерного оружия и вызывало бурные возражения гуманной общественности.

Прекращение ядерных испытаний, уменьшив число мутаций, подавляющее большинство которых вредно для человека, делает процесс эволюции человечества более устойчивым.

### **Устойчивость вида**

Организмы растений и животных весьма различны. К разным условиям приспосабливаются разные живые существа. Есть бактерии, которые живут в среде с уровнем радиоактивности в десятки тысяч раз выше уровня, смертельного для человека. Некоторые простейшие организмы выживают при охлаждении до температур, при которых сжижаются газы. Пища, ядовитая для одних организмов, необходима другим. Кажется бы, ничего общего у этих организмов нет. И тем не менее все организмы живут. Поскольку каждый экземпляр не вечен, значит, все организмы размножаются. Те виды, у которых это свойство атрофировалось, потомства не оставляют и, следовательно, исчезают. В «Этюдах о природе человека» знаменитый биолог конца XIX — начала XX века И. И. Мечников писал, что инстинкт, вызывающий преждевременную смерть, не может распространиться, так как смерть потомства не позволяет передать этот извращенный инстинкт по наследству.

Инстинкт воспитания потомства создает здоровое поколение, передающее и развивающее этот полезный для сохранения вида инстинкт.

Таким образом, для сохранения биологического вида необходима устойчивость инстинкта размножения. Ввиду особой роли размножения в жизни биологического организма естественно ожидать особой устойчивости физиологических функций, ведающих размножением. И эта устойчивость действительно наблюдается. Она проявляется в особой структуре половых клеток — с ней читатель может ознакомиться, например, по книжке Шарлотты Ауэрбах, упомянутой в сноске на стр. 63.

Особое место половых клеток подтверждается и тем, что они наименее восприимчивы к таким факторам среды, как питание. Половые клетки голодного и ожиревшего организма практически одинаковы. Это грубый пример, но глубоко аналогично ему явление регулирования питания ребенка в чреве матери. Плод «безжалостно» отнимает у матери недостающие ему вещества и отказывается брать ненужные. Именно поэтому режиму питания, да и всему режиму жизни беременных придается такое большое значение. Делать отсюда вывод о «неуправляемости» половых клеток и эмбрионов было бы неверно. Если бы это было так, то не существовали бы наследственные болезни. Половые клетки управляемы избирательно. Например, на них действуют половые гормоны, радиоактивное облучение и некоторые яды. Подробно говорить об этом мы здесь не будем. Укажем лишь на общеизвестный вред, приносимый потомству алкоголизмом родителей.

Устойчивость клеток, ведающих размножением, проявляется и в том, что при попадании организма в неблагоприятные условия (голод, переохлаждение, отравление, удары и т. п.) половые клетки страдают обычно в последнюю очередь — все механизмы живого существа становятся на их защиту. Она проявляется в высокой устойчивости инстинктов спаривания, выкармливания, охраны и воспитания потомства. Во многих случаях забота о потомстве простирается почти до того момента, когда оно достигает половой зрелости, т. е. до момента передачи эстафеты следующему поколению. Даже противоречащие этому на первый взгляд явления (например, пожирание новорожденного потомства некоторыми животными) подтверждают указанную мысль, если вспомнить, что для выкармливания многочисленного здорового потомства может не хватить сил и ресурсов. Даже вошедшее в поговорку отношение кукушки к своему яйцу не противоречит сказанному — подкладывание яиц в чужие гнезда есть разновидность заботы о продолжении рода. В противном случае кукушки бы просто вымерли. Чем больше опасностей угрожает потомству и чем оно малочисленнее, тем сильнее инстинкт заботы о следующем поколении.

И, наоборот, мухе незачем заботиться о каждом отложенном ею яйце: их так много, что маловероятно, что все они

погибнут без родительской заботы, а значит, и род мушиный не прекратится. Теперь, когда человек начал энергично уничтожать мух, было бы интересно проследить, не выведется ли порода мух, более тщательно заботящихся о своем потомстве. Почему бы и нет? Мух достаточно много, чтобы не считать невероятной такую мутацию, которая приведет к появлению и закреплению подобного инстинкта.

### **Физиологическая устойчивость организма и демпфирование в живой природе**

Каждый организм инстинктивно стремится либо создать себе наиболее благоприятную среду или микросреду, либо «приспособить» свою жизнедеятельность к сложившейся среде. Чем сложнее живое существо, тем больше механизмов помогают ему в этом. При перегреве растение может изменить поверхность листьев, поглощающую тепло и испаряющую влагу, животное — потеть, прятаться в тень, линять (сбрасывать зимний мех) и менять цвет шерсти на более светлый. Если летом у зайца шкура темнее, чем зимой, то это доказывает только, что перегрев для него менее опасен, чем зоркость его врагов. Поэтому мимикрия — изменение цвета на менее заметный на фоне среды — также способствует выживанию и данного организма, и вида в целом. Это случай совпадения интересов вида в целом и его представителя. Бывает, что эти интересы вступают в противоречие.

Многочисленные примеры самопожертвования родителей для спасения потомства или гибели самцов сразу после оплодотворения самок и самок после откладывания яиц (особенно часто это встречается у насекомых) лишь подтверждают особое место инстинкта размножения.

Для борьбы с переохлаждением живое существо может съежиться, впасть в спячку, приблизив свою температуру к температуре среды, мигрировать в более теплую местность, начать питаться более калорийной пищей и больше двигаться, обогреваясь таким образом изнутри, забраться в теплое помещение, сменить летний мех на более теплый зимний.

Человек дополнительно к этому перечню имеет теплую одежду и обогреваемые помещения. Однако злоупотреблять тем, что дан человеку разум, весьма опасно. Перехитрить природу не так просто. Управляет организмом не только среда, многоступенчатые системы управления есть и в самом организме. (Многоступенчатость эта состоит в том, что одни управляющие механизмы настраиваются и регулируются другими). Поддерживая среду постоянной, мы оставляем эти механизмы без работы, и они атрофируются. В результате, запасы устойчивости организма уменьшаются, и в итоге мы ничего не выигрываем. Наоборот, мы начинаем еще больше

зависеть от среды. Поэтому так велика роль закаливания организма как средства повышения запасов устойчивости. Все это относится не только к температуре и не только к человеку.

Морозоустойчивые и засухоустойчивые сорта растений, польза чередования умственного и физического труда и отказа при легких недомоганиях от лекарств — все, конечно, в разумных пределах — тому подтверждение. Слова «в разумных пределах» означают, что нельзя выходить за пределы имеющегося в данный момент запаса устойчивости и даже доходить до его границы. За растениями надо ухаживать и не надо забывать, что даже закаленные полярники не купаются в пятидесятиградусный мороз, а тренированные водолазы и аквалангисты подвержены кессонной болезни.

Здесь же можно отметить, что лучшая управляемость высоких форм движения материи позволяет живым существам находиться в состоянии с очень малыми запасами устойчивости. Простейший пример — канатоходец. Современной технике робот-канатоходец не под силу.

Обратим внимание на особенность последнего примера. Хотя запас устойчивости канатоходца мал и он не может позволить себе наклониться на большой угол, но этот запас известен. В задачах типа установления пределов закаливания запас устойчивости известен гораздо менее точно.

### **Ширина диапазона устойчивых состояний**

Открытия последних лет показали существование жизни в условиях, которые ранее считались гибельными для всего живого. Жизнь существует во льдах Антарктиды и в, казалось бы, мертвых песках пустынь. Жизнь есть в среде с высокой радиоактивностью и почти наверняка обнаружена в суровом климате Марса.

Всюду жизнь! Как же существует и развивается она, на первый взгляд столь хрупкая, иногда в столь суровых условиях? Что помогает живому существу при сильных возмущениях «не пересечь сепаратрису», отделяющую состояния, от которых возможен возврат к оптимальному — наилучшему состоянию, от состояний, ведущих к смертельному исходу?

В живой природе действует замечательный закон Вебера-Фехнера. Он гласит, что интенсивность восприятия пропорциональна не самой интенсивности возмущения, а ее логарифму. (Для живой материи обычно вместо слова «возмущение» употребляют термин «раздражение», но это, конечно, дела не меняет.) Закон Вебера-Фехнера можно сформулировать и так: при изменении интенсивности возмущения в геометрической прогрессии интенсивность восприятия меняется в арифметической прогрессии. Рассмотрим это явление на примерах, исполь-

зую график логарифмической зависимости интенсивности восприятия от интенсивности раздражения (рис. 32).

Воздействующая на человеческое ухо звуковая энергия, создаваемая близко пролетающим реактивным самолетом, в миллионы раз больше звуковой энергии, создаваемой шепчущим собеседником. Однако мы не в состоянии расположить

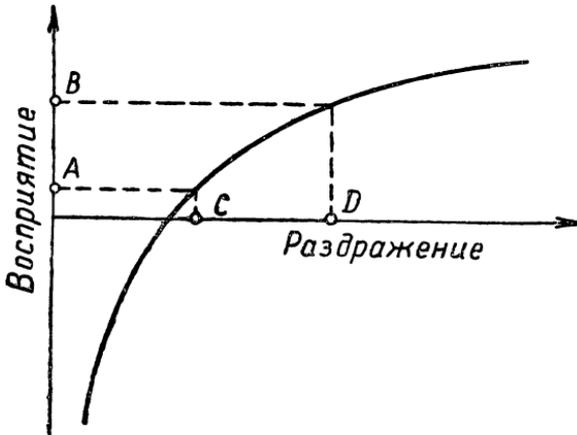


Рис. 32.

по степени громкости миллионы звуков. Субъективно мы, пожалуй, воспринимаем крик или громкий скрежет станка более близкими к реву реактивного двигателя, чем к шепоту. Энергетически это, конечно, не так. И объяснение этого видно на рис. 32, если представить себе, что по горизонтали отложена интенсивность звука, а по вертикали — субъективно воспринимаемая громкость.

Если точки A и B на рис. 32 изображают пределы физиологически возможного восприятия, то отрезок CD изображает допустимый диапазон физической интенсивности раздражения. То же самое верно для субъективно воспринимаемой яркости света или любого другого раздражителя. Чем больше раздражение, тем медленнее растет субъективное его восприятие живым организмом.

Проявления закона Вебера-Фехнера известны всем: все различают громкий шепот от тихого и не слышат крик на звуковом фоне работающего реактивного двигателя, никто не видит звезд днем, хотя они посылают нам столько же света, сколько и ночью.

Действие закона Вебера-Фехнера позволяет нам не отвлекаться на слабые управляющие воздействия при наличии сильных и реагировать на весьма слабые сигналы при отсутствии более сильных. Последнее очень важно — оно определя-

ет высокую чувствительность живых организмов и отдельных органов в состоянии покоя.

Посмотрите на большую крутизну графика логарифмической зависимости при малых значениях аргумента — раздражителя. Она определяет низкое положение порога чувствительности живых существ и, следовательно, сужает диапазон нечувствительности, «люфта», несрабатывания живого механизма по сравнению с «мертвой машиной».

Если бы зависимость восприятия от интенсивности раздражения была не логарифмической, а пропорциональной, то либо невыносимые (а может быть, и смертельные!) шум и яркость создавались свистком паровоза и сорокаваттной электролампой, либо мы были бы не в состоянии услышать шелест и не могли разглядеть светлячка и звезду на ночном небе.

Закон Вебера-Фехнера есть закон не только физиологический. Он, безусловно, распространяется и на психическую жизнь сознательного существа — человека. Проявление его в психической сфере состоит, в частности, в том, что многократно действующие или постоянные раздражители перестают замечаться. Закон Вебера-Фехнера распространяется, конечно, и на те элементы «умственной» деятельности, которыми обладают животные. Проявления закона у животных, по-видимому, не имеют существенных отличий от подобных проявлений у человека, кроме разве того, что *сознательно, усилием воли* человек может изменить ту реакцию на возмущение, которая должна следовать по закону Вебера-Фехнера. Подробно останавливаться на этом мы не будем.

Если человек чего-то не понял при первом объяснении, то повторное объяснение теми же словами вряд ли достигнет цели. Хорошую книгу приятно перечитать, но не сразу после первого прочтения. Девушка, падавшая в обморок при виде порезанного пальца, может, поработав некоторое время в больнице, спокойно присутствовать при операциях. Следовало бы обязать изучить закон Вебера-Фехнера родителей и учителей, злоупотребляющих замечаниями и нудной дидактикой, и удивляющихся неуправляемости детей под воздействием этих «благотворных» возмущений.

### **Устойчивость коллективов живых существ**

Между живыми существами могут складываться, помимо всех прочих, отношения прямой вражды, конкуренции и взаимопомощи. Именно они будут нас сейчас интересовать.

Отношения рысей и зайцев способствуют эволюции как тех, так и других: улучшение защитных качеств зайцев требует повышения атакующих способностей рысей — в противном случае им грозит голодная смерть; но эволюция рысей выдвигает

гает новые требования к эволюции зайцев. Предположив для простоты, что заяц — единственная пища рыси, а рысь — единственный враг зайца, мы легко приходим к выводу, что гибель зайцев приведет к гибели от голода рысей, а гибель рысей приостановит эволюцию зайцев. Так природа управляет развитием. В процессе охоты на зайцев рыси вступают между собой в отношения конкуренции. Поскольку они не нуждаются во взаимопомощи в этой охоте, очевидно, рысям нет надобности собираться в стаи.

Известно, что в периоды особенно сильных холодов пингвины сбиваются в кучу, уменьшая суммарный расход тепла стаи. Очевидно, что союзнические, хотя, быть может, и неравноправные, отношения в стае пингвинов способствуют благополучию стаи как целого.

Мы видим, что коллектив живых существ, рассматриваемый именно как коллектив, испытывает возмущения со стороны среды. Эти возмущения в некоторых случаях лучше демпфируются в одиночку, тогда стая распадается. В других случаях возмущения лучше демпфируются в союзе с себе подобными или с неподобными существами. Если превалирует первый тип возмущений, то живое существо живет в одиночку или семьей. При втором типе совокупности возмущений появляются стада или стаи животных. Если союз для выживания заключается с существами другого вида, мы обнаруживаем явление симбиоза. Все сказанное полностью относится, конечно, не только к миру животных, но и к представителям флоры.

Роль стада, отодвигающая пределы возмущений, которые приводят к гибели отдельный экземпляр (или семью или даже вид в целом), достаточно хорошо известна. Приведем примеры, в которых наиболее ярко проявляются черты устойчивости коллективов особей.

Некоторые птицы, оставшись почему-либо «бездетными», помогают выкармливать молодняк членам стаи, имеющим детей. Умиравшая от голода пчела отдает последнюю каплю корма матке. Изгнание трутней из улья происходит во время «продовольственных затруднений» у роя в целом.

Морские сомы при опасности собираются в шар — голова каждого сома находится возле центра шара, и на поверхности шара врага встречают острые хвосты.

Последний пример показывает, что существует некоторая оптимальная численность стаи. Действительно, несколько морских сомов не смогут выставить достаточно густой «частокол» на поверхности шара, а слишком большое количество их, хотя и может сбиться в несколько шаров, но уже самой своей многочисленностью будет привлекать врагов и конкурировать между собой в борьбе за пищу.

Влияние численности стаи на ее процветание исследовал французский ученый Шовен. Он установил, что количество осо-

бей в стае после достижения некоторой величины перестает расти даже при благоприятных условиях во внешней среде, Одним из возможных объяснений этого может быть то, что наиболее сильные члены стаи, подавляя наиболее слабых, лишают их пищи, самок и, следовательно, потомства. Весьма вероятно, что при численном росте стаи число «вождей» растет медленнее и относительное число «париев» возрастает. Поэтому с некоторого момента устанавливается естественное равновесие между числом новорожденных и числом смертей в стае.

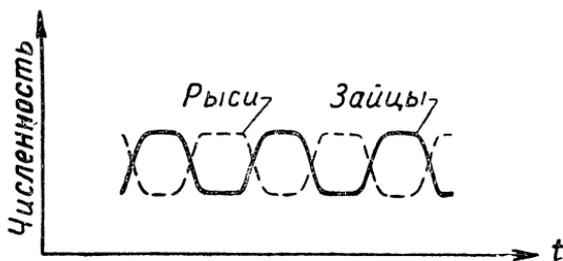


Рис. 33.

Замечены, хотя и не нашли пока себе объяснения, даже физиологические изменения у членов стаи после того, как она достигла критического количества особей. Там, где в отношениях членов коллектива явно взаимопомощь превалирует над конкуренцией, критической количественной величины коллектива, вероятно, просто не существует. Это, видимо, относится к уже упомянутым пчелам и, конечно, к человеку.

Интересное, с точки зрения устойчивости, хотя и весьма отвлеченное, рассуждение принадлежит американскому ученому Арнольду Тастину. Рассматривая вопрос о возможности автоколебаний в живой природе, он предложил следующую схему: чем больше зайцев, тем лучше питание рысей, число рысей увеличивается, из-за этого уменьшается число зайцев, что вызывает голод среди рысей, число их из-за голода уменьшается, благодаря уменьшившейся опасности улучшаются условия жизни зайцев, и число их возрастает, после чего процесс повторяется. Если бы все указанные изменения происходили мгновенно, то установились бы какие-то постоянные численности рысей и зайцев. Однако каждое следствие отстает по времени от своей причины и при определенной величине запаздывания устанавливаются колебания численности как зайцев, так и рысей. Возможная связь между числом тех и других показана на рис. 33 или фазовой картиной на рис. 34.

Возможно, что пример Тастина не есть беспочвенная абстракция. Подтверждениями тому, хотя и косвенными, могут служить следующие факты.

1. Чрезвычайный количественный рост некоторых видов, повторяющийся раз в несколько лет: саранча, божья коровка на юге Украины (в 1963 г.).

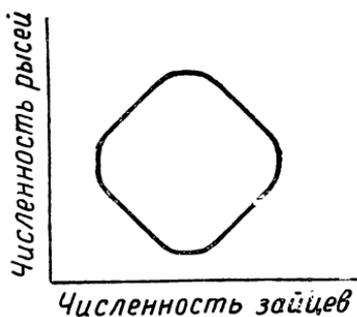


Рис. 34.

2. Регулярное усиление плодоношения яблонь раз в два года.

3. Периодичность эпидемий вирусного гриппа, связанная с тем, что после эпидемии в течение нескольких лет большинство населения сохраняет иммунитет. Чем сильнее эпидемия, тем больше людей после болезни перестают быть разносчиками заразы, демпфируя ее распространение. К моменту окончания периода невосприимчивости, который почти

одновременно у одновременно болевших, достаточно небольшого возмущения — нескольких заболевших — для лавинообразного распространения болезни. Опасность эпидемий для коллектива растет с ростом численности особей в коллективе. Весьма вероятно, что в больших коллективах животных инфекция распространяется быстрее, чем в среде людей, соблюдающих правила личной и коллективной гигиены. Трудно предположить, что природа не создала никакого защитного механизма против подобной угрозы.

Возможно, что такой же непознанный нами механизм устанавливает и критическое число особей в стае.

## УСТОЙЧИВОСТЬ И ЕЕ МЕСТО В ДВИЖЕНИЯХ МЫСЛЯЩЕЙ МАТЕРИИ

### О некоторых свойствах некоторых ошибок

Психическая жизнь человека дает много примеров, подтверждающих устойчивость ряда свойств мышления. На некоторые из них, а также на пользу и вред, которые она приносит, нам полезно будет обратить сейчас внимание.

Общеизвестно, что при выполнении большого числа однотипных операций, таких, как сложение столбца чисел на конторских счетах, ошибки встречаются довольно часто. Их нахождение обычно постороннему человеку дается быстрее, чем совершившему ошибку исполнителю работы. Двукратная и трехкратная проверка подобных вычислений исполнителем часто дает совпадающие ошибочные результаты. Конечно, подобная устойчивость ошибок не случайна. «Шаблонность» мышления, вызываемая автоматизмом работы, и чрезвычайно быстро вырабатывающийся автоматизм движений пальцев, «пересиливающий» воздействие идущих от мозга к пальцам

управляющих сигналов сознательного происхождения, делают весьма вероятной устойчивую повторяемость одинаковых ошибок, практически невероятную при формально-математическом подходе к задаче. В процессе перепечатки рукописи этой книги машинистка сделала серию печаток, состоявших в замене буквы «м» буквой «п». Можно полагать, что причиной такой систематической опечатки был переход на машинку с непривычной клавиатурой, непривычная поза в процессе работы или что-либо подобное. Начинаящая машинистка, не обладающая профессиональным автоматизмом, такие одинаковые опечатки, конечно, не совершит.

Каждый может вспомнить множество подобных случаев, подтверждающих, что условные рефлексы вырабатываются чрезвычайно быстро. Вообще, как условные, так и безусловные рефлексы представляют собой реакцию организма на возмущения со стороны окружающей среды. Воспринимаемые *рецепторами* — концевыми образованиями чувствительных нервов — эти возмущения управляют нервной системой (центральной или периферической), которая в свою очередь с помощью двигательных нервов управляет движениями органов тела. Под движением здесь, естественно, понимаются не только механические движения, такие, как перемещение конечностей, но и движения, состоящие в изменении режима работы желез, темпов протекания химических реакций в организме и т. п.

Простейший пример — отдергивание пальца, коснувшегося горячего предмета, — показывает, что большинство рефлексов имеет характер демпфирования возмущений.

«Житейская» мудрость давно подметила явление устойчивости ошибок. Недаром сложилась практика при возникновении трудностей приглашать, может быть, и менее квалифицированного специалиста, но способного посмотреть на работу «свежим глазом». Явления, определяемые словами «новая метла чисто метет», рекомендации при затруднениях переключиться на другую работу и вернуться к трудностям, когда они несколько забудутся, «переменить обстановку», изменить режим работы, — подобно проверке суммы путем сложения чисел снизу вверх по столбцу, — следует рассматривать как средство борьбы с излишней устойчивостью мышления, мышечной системы и управляющей ею нервной системы, недостаточно реагирующих на возмущения.

**Дискуссия о пословице**  
**«Только дураки никогда**  
**не меняют свое мнение»**

Устойчивость мышления, обычно принимающая форму рутины и консерватизма, весьма широко распространена. Она, но отнюдь не единственная, причина этого состоит в рас-

пространенных недостатках воспитания и обучения в семье и школе. Родители и учителя часто становятся на путь наименьшего сопротивления, излагая нормы поведения и научные факты *без объяснения причин*, по которым эти нормы должны соблюдаться, и законов природы, *объясняющих*, почему факты именно таковы. Утверждение: «Пушкин — гениальный поэт», даже не будучи подкреплено пониманием роли творчества Пушкина и красоты его стиха, чувств, порождаемых пушкинской поэзией, может стать *устойчивым* убеждением. Впрочем, убежденность здесь не подходящее слово. Более подходит термин «упрямство», от которого убежденность отличается *обоснованностью*.

Немотивированная устойчивая вера (вера — а не знание!) в гениальность Пушкина может послужить основанием для априорной веры<sup>1</sup> в бездарность Писарева, резко критиковавшего многое в творчестве Пушкина.

Это утрированный пример, но разве мы никогда не встречаемся с рассуждениями, построенными по *подобной* схеме? Разве не ставшее устойчивым в минувшие тяжелые годы убеждение производственников и плановиков, что «покупатель все купит», привело к перепроизводству некоторых неходовых товаров? Разве не ставшее из-за нашей былой бедности в те же годы устойчивым убеждение, что производство и распределение всех товаров надо исчислять «на душу населения» («всем матрешкам по сережкам») привело к тому, что в Крым завозили валенки, а в Мурманск босоножки?

Разве не устойчивое убеждение в необходимости роста *всех* производств приводило к увеличению производства керосиновых ламп чуть ли не теми же темпами, какими развивалась электрификация?

Как видно, при определенных условиях знания способны превращаться в веру. Это плохо всегда, но особенно плохо, когда эта вера становится настолько устойчивой, что приобретает бездумный, не реагирующий на факты, противоречащие «догматам» веры, религиозный характер.

Священник в церкви рассказывал прихожанам:

«Некогда еретики отрубили голову одному святому человеку. Тогда господь сотворил чудо: святой встал, взял отрубленную голову в руки и понес ее, лобызая». Один из прихожан спросил: «Чем же он лобызал ее? Ведь уста его были на отрубленной голове!» Ответ священника гласил: «Веровать надо, сын мой, а не сумлеваться».

Не случилось ли вам, читатель, давать подобные ответы на вопросы? Подумайте, что воспитывали эти ответы в ваших

---

<sup>1</sup> Априорная — возникающая без проверки и обоснования. Термин происходит от латинского a priori — независимо от опыта, до проверки, заранее.

собеседниках. И признайтесь, что чаще всего подобные ответы достаются вашим собственным детям.

Знание большого количества фактов, конечно, полезно. Но, характеризуя высокую устойчивость памяти, оно отнюдь не равнозначно способности к самостоятельному мышлению. В свете этого также полезно было бы рассмотреть вопрос об оптимальном объеме учебных программ в средней и высшей школе. Этот вопрос в последние годы был предметом многих обсуждений в нашей периодической печати. К сожалению, объем этой книги не позволяет нам рассмотреть его подробнее.

Вера так же свойственна религиозным воззрениям, как понимание — научным. И вера и понимание могут быть устойчивыми. Но в отличие от религии, круг вопросов, возникающих перед познанием, все время изменяется. «Вызубренное» понимание при консервативном, устойчивом складе мышления сопротивляется напору фактов, тормозит развитие образования и науки. Если пятиклассник никак не может понять возможность вычитания большего числа из меньшего, а академик с юности настолько верит в законы сохранения материи и энергии (порознь в каждый закон!), что не может понять смысл эйнштейновской формулы: «энергия равна произведению массы на квадрат скорости света» и явления «дефекта массы», то стиль их мышления одинаков, несмотря на разницу в объеме знаний. Оба они будут встречать в штыки все новое, передовое, оба будут жить по принципу «этого не может быть потому, что этого не может быть никогда». К счастью, пятиклассники обладают менее устойчивым складом мышления, чем академики — уже в силу одних только возрастных различий.

## **О мышлении и образовании**

Здесь уместно призадуматься над афористическим определением: «Образование — это то, что остается, когда все выученное уже забыто». Вряд ли правильно видеть в этом определении только шутку. Действительно, образованный человек пишет грамотно, не вспоминая каждый раз соответствующие правила грамматики; вычисляет, не обращаясь к элементарным правилам арифметики. Образованный человек имеет даже право обладать самым смутным представлением о периодическом законе Менделеева, но обязан знать, что найти этот закон можно в справочнике по химии, а отнюдь не по метеорологии. Именно умение, не загромождая свою память, достаточно быстро ориентироваться в нужных тебе для работы, любимых увлечений и обыденной жизни учебниках, справочниках и блокнотах, знание, где именно следует получать справки и консультации, дает человеку право считать себя

образованным. Вызубренный набор фактов никогда не перекроет по эффективности подобное умение — либо памяти не хватит, либо из нее будут извлекаться ответы не на те вопросы, которые «были заданы».

Подобные знания, конечно, признать устойчивыми нельзя. Любое «возмущение» на привычную «вызубренную» формулировку задачи покажет неустойчивость таких «познаний».

Анекдотичным и в то же время, к сожалению, нередко встречающимся подтверждением этого являются ученики, умеющие (формально!) решить пример с  $x$  и  $y$  и становящиеся в тупик перед тем же примером, если неизвестные обозначены другими буквами. Это прямой укор педагогам, которые с помощью исторически сложившейся и оказавшейся устойчивой системы обозначений воспитывают устойчивость мышления, переходящую в шаблонность. Но на все случаи жизни шаблоны не подберешь!

Вся история человечества, и особенно история науки подтверждают, что большинству людей с возрастом слишком многое начинает казаться самоочевидным, настолько простым, что «и думать-то тут не над чем». Именно этим объясняется, что большинство крупных научных достижений добыто людьми молодыми. Невольно вспоминается ставшая классической шутка о происхождении великих изобретений: «Все знают, что это сделать нельзя. Но потом находится невежда, который этого не знает. Он-то и делает изобретение».

И, наконец, именно поэтому автор всячески рекомендует читателям фантастический рассказ Р. Джоунса «Уровень шума», опубликованный в журнале «Наука и жизнь» в 1964 г., повествующий о том, как оказалось достаточным для решения сложнейшей физической проблемы обмануть физиков и уверить их, что некто эту проблему решил. Вера в невозможность решения была поколеблена, и решение найдено!

### **Устойчивость и управляемость психики**

Простые примеры показывают необходимость совершенно четкого определения: какое именно состояние или процесс мы считаем невозмущенным в отличие от всех иных состояний или процессов, могущих иметь место под влиянием возможных возмущений. То же самое, конечно, нужно и для простых движений. Изменяя мощность порохового заряда, можно рассчитать различные траектории движения артиллерийского снаряда при условии отсутствия других возмущений — ветра, погрешности в угле наводки, отклонений плотности атмосферы на разной высоте от принятой в так называемой стандартной атмосфере и т. п. Принимая некоторую номинальную мощность

за невозмущенную, а отклонения мощности от номинала за возмущения, мы получим невозмущенное движение и совокупность возмущенных.

Повышая требования к логической строгости, мы должны будем говорить не о мощности заряда, а обо всех параметрах, определяющих скорость снаряда в момент вылета из ствола орудия. Что именно принять за номинал, находится в нашей власти. Другими словами, это зависит от определения. Однако чем проще движения, тем меньше мы рискуем возможностью разных толкований, подменяя логическую строгость интуицией.

В вопросах психической жизни иногда очень трудно различать устойчивость и управляемость. Рассеянные или глубоко чем-либо увлеченные люди (часто это встречается у детей) автоматически называют собеседников не их именами, а именами, которые им приходится употреблять чаще других, идут привычным маршрутом даже, если его надо изменить. (Необходимость изменения маршрута можно рассматривать как возмущение привычного маршрута.) Обычно это квалифицируется, как невнимательность. Однако то же самое может быть и при высокой внимательности, но сосредоточенной на каких-либо «своих» мыслях. Что считать «управляемостью» внимания? Способность переключаться на всевозможные многочисленные «возмущения» — появление новых лиц, отвлекающие звуки и т. п., или, наоборот, способность сосредоточить внимание на основном деле, не отвлекаясь на помехи? Вряд ли возможно переоценить важность этих качеств для определения соответствия типа психики выбранной профессии. Видимо, в таких вопросах нужен конкретный подход и строгая логика в определении.

Современная психофизиология классифицирует темпераменты людей и типы их нервной системы. Не вдаваясь в существо этой классификации, мы можем отметить тесную зависимость между темпераментом, типом нервной системы, характером человека и степенью пригодности его к той или иной деятельности. Связь эта, конечно, не является столь жесткой, что приговаривает человека от рождения к тому или иному виду занятий на всю жизнь. Великий физиолог И. П. Павлов считал, что хотя тип нервной системы есть *генотип* — приращенное качество, но характер возникает как сплав черт типа нервной системы с условными рефлексиями. Последние же, как известно, вырабатываются воспитанием, т. е. внешней средой. Следовательно, характер представляет собой *фенотип* — качество, обусловленное внешней средой, которую нам следует рассматривать как возмущение на генотип. Воспитание тех или иных черт характера для лиц разного темперамента требует разных методов. Ясно, что роль психологов в определении соответствия врожденных качеств и приобретенного характера профессии, а также в задаче о правильном

комплектовании рабочих коллективов, «возмущающих» входящую в коллектив личность, переоценить трудно.

На западе в последнее десятилетие быстро развивается так называемая *микросоциология*. Она призвана искать наилучшие методы организации малых коллективов — масштаба бригад или учебных классов, методы определения требований к руководителям и подчиненным, обеспечивающие наибольший *суммарный* эффект деятельности коллектива. Многие в выводах микросоциологии спорно, но каждый знает, что работа лучше идет с приятным напарником, а конкурирующие и конфликтующие друг с другом директор и главный инженер могут развалить работу целого завода. При этом чем они энергичнее, тем худшим будет суммарный результат. А ведь энергия у руководителя — качество полезное. Видимо, много верного, если не в выводах, то в методах микросоциологии все же есть.

У нас роль психологии в такого рода задачах часто недооценивается. Несомненно, что психологи многое могли бы сделать не только в рабочих, но и в учебных коллективах. При распределении школьников по параллельным классам, поиске наилучшего соответствия данного учителя данному классу, при рекомендациях в выборе профессии тем, у кого к концу учебы не появилось четких устремлений, участие психолога, вероятно, было бы очень полезным.

Сказанное не исключает, конечно, того, что и сами характеристики умственной деятельности подвержены управлению со стороны человека. Каждый может «заставить» себя, преодолев известные трудности, научиться сосредоточенно работать даже в шумной обстановке при посторонних людях, при звуках музыки и разговора. Эту способность, пожалуй, правильно называть самоуправляемостью. Однако, в какую сторону развивать свои способности — зависит от профессии и типа работы, возраста и режима жизни и других причин. Давать конкретные рекомендации в этой области — опять-таки дело психологов.

### **Объем информации и ее сохранность**

Одна из важнейших, если не самая важная, задача устойчивости явлений психической деятельности — это задача обучения. В наиболее общем виде ее можно поставить следующим образом: указать методы получения информации, обеспечивающие возможность ее использования в тот момент, когда она понадобится. Эта формулировка нуждается в разъяснении и конкретизации. Под информацией нужно понимать не только круг знаний, объединяемых обычно понятием образования, но и большое количество сведений и навыков, необходимых в повседневной жизни.

Динамичная жизнь наших современников требует использования все большего и большего количества информации. Знания научного характера, получаемые нами в процессе систематического обучения в разного типа учебных заведениях — от детского сада до университета, — обычно поступают к нам в виде, удобном для усвоения. Степень этого удобства зависит, правда, от педагогического мастерства учителей и индивидуальных качеств учащихся. Об этом мы говорили выше и еще будем иметь повод сказать.

Педагогическая наука и разного вида правила, классификации и систематизации, без которых никакая наука существовать не может, дают возможность получать ответы на необозримое количество различных вопросов. Так, таблица умножения и единое правило умножения многозначных чисел позволяют вычислять произведения любых сомножителей, записанных в позиционной системе счисления, т. е. в общепринятой системе, где значение цифры зависит от разряда, в котором она находится.

В числе 312 цифра 2 означает два, а в числе 256 эта же цифра означает двести. Чтобы понять преимущества позиционной системы, следует попытаться выполнить умножение чисел, записанных римскими цифрами, например умножить  $164 = \text{CLXIV}$  на  $1965 = \text{MCMLXV}$ .

Другим примером роли классификации может служить попытка заучить свойства химических элементов, не пользуясь периодическим законом Менделеева.

Возвращаясь к информации, используемой в обыденной жизни, мы заметим, что она, как правило, почти не систематизирована. Примерами служат ваш и ваших знакомых адреса, номера телефонов, маршруты и расписания работы транспорта, номера служебных пропусков, цены на товары повседневного спроса (цены на редко покупаемые товары запоминать, очевидно, не стоит), расписания режимов работы и учебы, названия нужных вам книг и т. п.

Сведения, подобные таблице умножения, мы почти никогда не забываем. Это объясняется тем, что, если они и забыты, их можно «сообразить», т. е. вывести путем логических рассуждений из незабытых. Именно этим объясняется сравнительно высокая устойчивость памяти по отношению к сведениям научного характера<sup>1</sup>. А как «сообразить» забытый номер телефона? Добиваться устойчивого запоминания таких сведений нужно лишь в ограниченной мере. Действительно, если память «засорена» сведениями, надобность в которых миновала, это

---

<sup>1</sup> В психологии принято деление памяти на смысловую и механическую. Пользование механической памятью в определенных пределах необходимо (некоторые сведения, такие, как номер телефона, нужно «вызубрить»), однако уже при заучивании роли артистом, «вжившимся» в изображаемый образ, смысловая память оказывает большую помощь механической.

отрицательно сказывается на запоминании новых нужных сведений. В то же время весьма желательным было бы внедрение некоторой (в пределах возможного) систематизации подобных сведений.

В последние годы много обсуждались в печати вопросы благозвучности названий, увековечения в названиях улиц и зданий памяти замечательных людей, ликвидации названий, могущих вносить путаницу и т. п. Высказывались различные точки зрения, но среди поданных голосов автор не слышал ни одного в пользу системы названий, помогающей разгрузить память и помочь находить нужное с помощью логики.

Приведем несколько примеров, относящихся к Москве, но типичных, видимо, и для других городов.

Улица Горького в Москве ведет от центра к Ленинградскому шоссе и далее на Ленинград, но отнюдь не на город Горький. На этой улице находится гостиница и ресторан «Минск», а автомобильная гостиница — мотель без названия на Минском шоссе — является филиалом гостиницы «Пекин». Проспект Калинина и Калининский район находятся в противоположных концах города, а Октябрьская площадь находится километрах в пятнадцати от улиц Октябрьского поля.

Кинотеатр «Ленинград» расположен не на Ленинградском проспекте, а кинотеатр «Мир» — не на проспекте Мира. От кинотеатра «Россия» до одноименной гостиницы, в которой расположены свои кинозалы, около 2 километров, а кинотеатр «Центральный» — отнюдь не ближайший к центру города.

В Москве есть 16 Парковых улиц, расположенных параллельно друг другу в одном районе города. Их местоположение и проезд к ним известны большинству москвичей. Также ясно, что от 5-й до 8-й Парковой ровно три квартала. Уже были выступления в печати о том, что некрасиво звучит название «энная» Парковая, и эти улицы нужно переименовать. Откуда у авторов этих предложений берутся в голове свободные «ячейки» памяти? Почему они стремятся загрузить эти ячейки абсолютно служебными, непроизводительными сведениями?

Невозможно понять и причины, по которым одна и та же улица на разных отрезках называется по-разному. Москвич может в качестве примера вспомнить переходящие одна в другую улицы Чехова, Каляевскую, Новослободскую и далее Дмитровское шоссе. Утешением служит то, что шоссе, действительно, ведет в город Дмитров. Может быть, стоит переименовать?

### **Устойчивость опознавания**

Все мы знаем громадное количество предметов и явлений. И тем не менее нам случается из-за изменения какого-то одного или нескольких признаков не опознать предмет или яв-

ление, т. е. не суметь произвести отождествление предмета с его образом<sup>1</sup>, хранящимся в нашей памяти. Причины этого могут быть не только в том, что предмет или явление возмущены в одном или нескольких признаках (знакомый человек в незнакомом костюме), но и в возмущенном состоянии нашего внимания — степень усталости, сосредоточенности, подготовленности к встрече данного явления в данный момент и в данном месте. Поэтому процессы *узнавания* представляют для нас значительный интерес.

Особенность явления узнавания состоит в способности после знакомства с несколькими экземплярами какого-либо класса предметов или событий правильно относить к этому классу новые, *впервые встретившиеся экземпляры* элементов этого класса.

Поскольку каждый предмет, каждое явление не могут абсолютно не изменяться при разных появлениях, то их можно рассматривать как разные экземпляры, а поскольку изменения эти обычно не очень велики, все эти экземпляры логично относить к одному классу. Поскольку для опознавания необходимо отождествить явление экземпляра с образом в памяти, необходимо считаться с тем, что сам образ претерпевает изменения под воздействием возмущений, действующих на нашу психику. Именно поэтому при встрече со знакомым, которого вы давно не видели, вы можете не узнать его даже в том случае, если он мало изменился. Это значит, что значительно изменился его образ, хранящийся в вашей памяти.

Мы с первого взгляда узнаем примерный возраст людей, породы животных и растений, типы автомобилей, различаем мужские и женские голоса, звуки, издаваемые машинами и животными, понимаем текст, написанный незнакомым почерком. При этом важно, что мы узнаем в животном собаку, даже если видим собаку впервые встретившейся нам породы. Мы уверенно опознаем в движущейся машине автомобиль, даже если раньше автомобилей этой марки не видели. Способность узнавать становится устойчивой после знакомства с некоторым, достаточно большим, количеством экземпляров — представителей класса. Несомненно тесная связь способности к узнаванию с памятью и мышлением. Для узнавания необходимо: во-первых, хранение в памяти какого-то количества признаков, объединяющих в своей совокупности экземпляры класса, во-вторых, умение провести достаточные отбор и классификацию признаков.

Наблюдения над детьми в процессе их знакомства с новыми предметами и явлениями позволяют установить, как способность узнавания становится все устойчивее, а ошибки —

---

<sup>1</sup> Под образом нужно понимать все качества, воспринимаемые нашими органами чувств; не узнать можно не только внешность, но и голос и вкус.

все реже. Это, конечно, происходит потому, что увеличивается количество хранящихся в памяти признаков ранее встреченных экземпляров класса и приобретаются навыки правильной классификации. Весьма прискорбно, что параллельно с этим процессом часто идет процесс, состоящий в постепенной утрате способности удивляться. Привычка притупляет способность внимательно относиться к новым экземплярам. Обнаружив ряд признаков предмета или явления, мы тут же относим экземпляр к какому-либо классу. Поскольку каждый экземпляр обладает бесчисленным множеством разных признаков, мы иногда теряем при этом такие признаки, которые могли бы существенно повлиять на отнесение экземпляра к определенному классу.

Внимание наше обычно привлекают экземпляры с редко встречающимся сочетанием признаков — человек необычно высокого роста или в непривычной одежде, резкое изменение в окружающем шуме и освещении. Многие спокойно пройдут мимо крокодила в зоопарке, но кто не остановится возле крокодила, вылезавшего из водосточного колодца на людной улице! В чем дело? Зоопарк и крокодил — это привычно. Крокодил и улица — слишком непривычное сочетание!

Здесь мы не имеем возможности разобрать этот вопрос подробно и поэтому укажем лишь на то, что миллионы людей до Ньютона смотрели на падающие яблоки, но никто из них не открыл закон всемирного тяготения. Можно полагать, что если бы падение предмета было редким явлением, то над ним чаще бы задумывались и открыли закон всемирного тяготения раньше. (Здесь, конечно, абсолютно не существенно, падало ли в действительности яблоко на голову Ньютона. Во всяком случае, на многих из тех, кто не открыл закон тяготения, что-нибудь да падало.)

Берегите у себя способность не утрачивать внимания к «второстепенным» признакам, к тем, которые мы обычно отбрасываем, полагая, что они уже не способны повлиять на классификацию! Развивайте внимание у своих детей! Смотреть на шахматную доску могут все, а видеть ведущий к победе ход — лишь немногие. Помните смысловую разницу между глаголами «смотреть» и «видеть»!

### **Устойчивость систематизированных знаний**

Немалый практический интерес представляет вопрос об устойчивости знаний, приобретаемых в процессе систематического обучения в школе и других учебных заведениях. В связи с этим необходимо выяснить, какие именно возмущения приводят к утрате сведений научного характера. Довольно легко указать основные такие возмущения. Это, прежде всего, *редкое*

*пользование знаниями.* По наблюдениям автора, определенными знаниями пользуются крайне редко или совсем не пользуются в следующих случаях:

1. Когда специальность и производственная деятельность бывшего учащегося настолько далеки от сферы применимости определенных знаний (или навыков), что они ему совершенно не нужны.

2. Когда полученные знания настолько малы (или усвоены настолько формально), что практическое пользование ими оказывается непосильным.

3. Когда существуют практически более простые или более удобные методы достижения той же цели.

4. Когда учащегося вынуждают поглощать большой объем сведений за короткое время.

5. Когда в учебном процессе учащийся не в состоянии различить главное от второстепенного, фундаментальные понятия от частных примеров и пояснений, теоретические обоснования от практических рабочих методов.

Не претендуя на полноту указанного перечня, мы можем сделать полезные выводы из приведенной классификации причин неустойчивости знаний, влекущей за собой их утрату. А ведь утрата знаний приносит зачастую больше вреда, чем даже утрата материальных ценностей.

И знания, и материальные ценности для своего создания требуют затраты труда, который, как всякий труд, может быть выражен экономическими категориями. Однако следствия утраты знаний, выражающиеся в последующих экономических потерях за счет понижения квалификации, составляют только долю от общей потери. Существуют психологические следствия, выражающиеся в потере веры в пользу обучения. Эти следствия распространяются не только на учащихся, но и на педагогов. Мы знаем многих людей, бросивших учебу и не возобновляющих ее потому, что они не помнят того, чему учились раньше. Можете ли вы представить себе человека, бросившего работу потому, что он потерял получку за прошлый месяц?

Попробуем теперь проанализировать перечисленные выше случаи неиспользования знаний.

1. Создание в средних школах старших классов различного направления — физико-математического, естественного, гуманитарного — в значительной степени сужает круг знаний, не находящихся в дальнейшем своего применения; концентрация внимания на круге более близких друг к другу вопросов позволяет учащемуся усвоить больший объем сведений; этому способствует имеющее, как правило, место совпадение этого круга с кругом интересов учащегося. Качество знаний при этом также повышается.

Более углубленное изживание ненужных сведений требует

более тонких методов. Возможными путями являются: выборочный опрос (без специальной подготовки экзаменуемых к опросу!) по материалу учебной программы бывших учащихся через 2—5 лет после окончания учебного заведения и статистическая обработка результатов этого опроса; регулярная передача программ и учебных планов вузов и техникумов на рецензирование в передовые организации и предприятия соответствующих отраслей промышленности. Должно быть покончено с формальным внедрением в учебные программы «передового» материала на том основании, что соответствующая техника «будет» внедрена в промышленность — темпы развития современной науки слишком быстро делают передовое устаревшим, а темпы потери «пока» неиспользуемых сведений слишком велики. Примерно то же влияние на знания оказывает необеспеченность учебными пособиями. Нельзя научиться управлять автомобилем и обслуживать его на схемах и чертежах, не имея возможности «пощупать» автомобиль. Аналогичное положение сложилось в некоторых учебных заведениях при введении курса программирования для электронных математических машин до обеспечения учебных заведений самими быстродействующими вычислительными машинами. Количество примеров легко пополнить, но вряд ли это здесь нужно.

2. В связи со вторым случаем находится проблема оценки знаний. Как и всякая другая условность, проведение сепаратрисы, отделяющей зачетные знания от незачетных между оценками «2» и «3», конечно, само по себе возражений не вызывает. Сомнительно другое. Сепаратриса, отделяющая знания, достаточно устойчивые, чтобы они могли быть практически использованы, от знаний, недостаточных для использования, обычно лежит значительно выше — около оценок «4» и «5».

Существующие уровни экзаменационных требований, типы экзаменационных вопросов и стиль экзаменов, зачетов, контрольных работ и других проверяющих знания и умения мероприятий слишком часто не соответствуют требованиям практики. Слишком часто школярское выражение «сдал» не является синонимом слов «знаю», «умею».

Все это есть следствие процентомании в учете результатов обучения. «Борьба» с ней велась еще когда автор ходил в первый класс. Не пора ли уже одержать победу?

3. Третий случай более всего связан с вопросом о содержании учебного курса. Быстрое развитие наук создает тенденцию к механическому росту объема изучаемого материала и неоправданному разбуханию учебников. Программы весьма многих курсов нуждаются в придирчивой ревизии содержащегося в них материала.

К указанным, уже ставшим банальными, соображениям нужно добавить следующее.

Рост объема изучаемого материала без понимания некоторых фундаментальных истин и фактов (обычно немногочисленных), по-видимому, совершенно бесполезен. Хорошее же овладение фундаментальными понятиями, позволяя самостоятельно вывести или найти в литературе нужные частности, делает бесполезным подробное изучение деталей.

При установлении объема учебной программы и сетки учебных часов следует постоянно проверять их законом Вебера-Фехнера. Изложенное на стр. 68—69 ясно показывает, что каждая следующая «порция информации» для своего усвоения требует большего времени и больших усилий, чем предыдущая. Последнее, конечно, относится только к людям, уже вполне привыкшим к умственной работе.

На неустановившемся этапе процесса — этапе «втягивания» в работу — закон Вебера-Фехнера вряд ли полностью применим для оценки потребных усилий. Во всякой работе закон Вебера-Фехнера справедлив по отношению к интенсификации индивидуального труда, не сопровождаемой организационно-техническими улучшениями его условий.

4. Четвертый случай не нуждается в подробном разборе, так как он оказывается очевидным следствием закона Вебера-Фехнера. Способность выполнять за короткое время большую работу, т. е. развивать большую мощность<sup>1</sup>, более всего свойственна спортсменам-спринтерам. Однако большая мощность не равнозначна большой производительности труда ни в физической, ни в умственной деятельности.

5. Пятый случай является обобщением на научные сведения соображений, высказанных на стр. 79, относительно сведений бытового и житейского характера. Здесь нам достаточно отметить, что при утрате научных сведений их восстановление требует обычно значительно большего труда, чем в случаях обыденной жизни. Поэтому целесообразно для научных сведений обеспечивать сравнительно большой запас устойчивости.

### **Устойчивость господствующих мнений и гражданское мужество**

Некоторые общественные явления, хотя и не соответствуют новым условиям жизни и громко осуждаются передовыми кругами общества, оказываются поразительно живучими под влиянием указанных возмущений. Признать изменение условий жизни общества слабым возмущением, по всей видимости, было бы неверно. Остается признать, что запас устойчивости пережитков прошлого очень велик. Все это, конечно, с точки зрения общепринятой терминологии. В действительности понятия «большой» и «малый» сами по себе ничего не говорят,

<sup>1</sup> Напомним, что мощность = работа : время.

большим или малым можно быть только относительно другой величины; изживших себя, но устойчивых явлений отнюдь не мало — они охватывают широкий диапазон от суеверий и предрассудков до религиозного фанатизма, от подхалимства до боязни признаться в том, что вам не нравится что-либо, восхваляемое окружающими.

В средние века все новые идеи считались плохими уже потому, что они были новыми. Демпфирование возмущений во взглядах и поведении людей было очень сильным. Это не могло не оказать отрицательного, тормозящего влияния на ход истории, хотя главной причиной устойчивости средневекового общества было то, что зарождавшиеся в нем производительные силы и производственные отношения капиталистического общества до поры, до времени были очень слабым возмущением. Когда же возмущения оказались способными преодолеть запас устойчивости, которым обладал феодализм, крушение его приняло лавинообразный характер.

В наше время новое прокладывает себе дорогу легче. И, однако, «еретические», с точки зрения общества, взгляды встречают иногда очень сильное демпфирование. Чтобы проиллюстрировать это примерами, достаточно задать следующие вопросы.

1. Хватило ли бы у вас мужества публично заявить, что закон сохранения энергии неверен, если бы вы были убеждены в этом? При этом неважно, школьник вы или профессор физики.

2. Могли бы вы пойти в театр в валенках, даже если у вас отморожены ноги? Не предпочли ли бы вы вовсе отказаться от театра?

3. Хватит ли у вас мужества в кругу друзей наполнить свою рюмку кефиром, даже если вам очень не хочется пить что-либо более крепкое?

Ответ на эти вопросы показывает запас устойчивости ваших внутренних убеждений, гражданского мужества и интенсивность возмущений, которые вы способны приложить к окружающей вас среде.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Об общем определении понятия «устойчивость»**

После перечисленных случаев употребления термина «устойчивость» возникает желание дать определение этого понятия, т. е. сказать, что именно понимается под этим словом. Первое естественно напрашивающееся определение могло бы

звучать так: устойчивость — это способность явления (состояния или процесса) мало изменяться (или совсем не изменяться) под действием причин, стремящихся его изменить. Эти причины мы назвали возмущениями.

Примерно таким пониманием устойчивости и пользовались в науке вплоть до конца XIX столетия, хотя нужно сказать, что в те времена проблема устойчивости не имела столь большого значения, как сейчас, и использование этого понятия вообще было весьма ограниченным. Однако, как мы сейчас увидим, приведенное определение имеет существенный недостаток. Забегая вперед, скажем, что на строгую научную основу изучение устойчивости поставил замечательный русский механик и математик Александр Михайлович Ляпунов в своей работе «Общая задача об устойчивости движения» в 1892 г.

Сформулированное выше определение устойчивости рассматривает явление как нечто целое, характеризующееся каким-либо единственным способом. Однако реальные состояния и процессы в природе для своего полного описания нуждаются в рассмотрении многих разных свойств и характеризующих их величин. Даже в простейшем механическом движении легко указать случаи, когда процесс, устойчивый с одной точки зрения, неустойчив с другой. Два равномерно движущихся по одной и той же прямой трубе тела имеют одну и ту же траекторию. Изменение скорости одного из тел — будем считать это изменение возмущением — не способно изменить траекторию движения. Не способно в том смысле, что оба тела будут по-прежнему двигаться вдоль трубы. (Для простоты мы считаем трубу настолько длинной и узкой, что отклонениями от оси трубы можно пренебречь.) Следовательно, траектория устойчива относительно возмущений скорости.

Однако, если тела, начав движение одновременно из одной и той же точки, имеют разную скорость, то с течением времени они удалятся друг от друга сколь угодно далеко, даже если разница скоростей будет очень малой. Расстояние между телами неустойчиво зависит от начальной скорости. Можно представить себе, что мы изучаем движение только одного тела и рассматриваем влияние ошибки в начальной скорости на его траекторию и положение через некоторое, не очень малое, время после начала движения. Вывод очевиден: тело обладает устойчивостью траектории и неустойчивостью положения в интересующий нас момент времени относительно возмущений начальной скорости. Если труба имеет в стенке отверстие, близкое по величине к размерам движущегося в ней тела, то траектория оказывается неустойчивой относительно возмущений размеров этого отверстия. От малого изменения размера отверстия зависит, «провалится» тело или нет. Если же размер отверстия много меньше или много больше размера тела, то малые изменения его уже не повлияют на возможность

покидания телом трубы, и траектория опять оказывается устойчивой по отношению к такому возмущению.

Можно еще более усложнить задачу, изучая влияние положения отверстия в трубе — ведь в отверстие в верхней части трубы тело, движущееся в поле тяжести, не проскочит независимо от размера отверстия, и трубу можно заменить открытым желобом. Если тело и (или) отверстие имеют неправильную форму, то устойчивость траектории окажется зависящей от ориентации тела в пространстве в момент прохождения возле отверстия.

Пожалуй, сказанного достаточно, чтобы понять, насколько нелегко дать определение устойчивости, достаточно общее для того, чтобы охватить все случаи использования термина и в то же время достаточно «работоспособное» для использования в каждом конкретном случае. Говоря об устойчивости в наиболее общем смысле, можно сказать, что явление устойчиво, если малое изменение причин влечет за собой малое изменение следствий. Это определение окажется практически бесполезным и теоретически бессодержательным, если мы не укажем, какие изменения в причинах и в следствиях мы считаем малыми. Так, при стрельбе в малую по размерам цель довольно значительные отклонения в весе снаряда или пули не имеют обычно существенного значения для результата. То же относится и к промаху, пока промах не превышает расстояния от точки прицеливания до границы цели. Если же мы вообще не попали в цель, то не имеет значения, промахнулись мы очень немного или стреляли в сторону, противоположную цели.

Если мы изучаем работу радиолокационной станции, следящей за самолетами в районе аэропорта, то нам важно знать, какие причины могут привести к нарушению работоспособности станции. Основное физическое явление, используемое для функционирования станции, — это отражение радиоволн.

Сигналы, отраженные от самолетов, находящихся вблизи станции, поступают на антенну радиолокатора вместе с паразитными сигналами от посторонних радиоотражающих тел и от электрических зарядов в атмосфере. В аппаратуре самой станции также могут возникать электрические и магнитные поля, создающие ложные сигналы на экране радиолокатора.

Эти причины, называемые обычно помехами или шумами, искажают изображение на экране радиолокатора. Если искажение настолько велико, что оператор станции по изображению не в состоянии установить количество самолетов и местоположение каждого из них, то радиолокационная станция оказывается бесполезной. В идеальном случае оператор получил бы качественно полную и количественно точную информацию обо всех самолетах в обслуживаемом пространстве. Такое состояние системы пространство — радиолокатор — оператор естественно считать невозмущенным.

Возмущениями являются все проникающие на экран ложные сигналы и качественные и количественные ошибки оператора. Если следствием этих ошибок может явиться нарушение безопасности самолетовождения и выполнения задач, поставленных перед самолетами, то работу возмущенной системы (а невозмущенной практически она никогда не бывает) следует считать неустойчивой. Если гарантировано, что все возможные помехи и ошибки не нарушат функционирование обслуживаемого аэропорта, то систему следует признать устойчивой. При этом, конечно, возникнет потребность точно определить, что такое правильно функционирующий аэропорт. Нам придется установить количественную меру гарантированной безопасности, допустимые нарушения расписания и т. п. Путь рассуждений, которые придется при этом провести, достаточно понятен, и останавливаться на нем мы не будем.

Вместо этого предложим рассмотреть следующее определение.

*Пусть явление  $B$  есть следствие явления — причины  $A$ . Если при замене явления  $A$  явлением  $A_1$ , в некотором смысле близким явлению  $A$ , следствием этого будет явление  $B_1$ , в некотором смысле близкое явлению  $B$ , и если это имеет место для всех возможных явлений  $A_1$ , то явление  $B$  называется устойчивым относительно явления  $A$ .*

### **Устойчивость и кибернетика**

Теория управления, рассматриваемая с кибернетической точки зрения, базируется на способности различных систем (безразлично, мертвой или живой материи), реагировать на поступающие сигналы, несущие какую-либо информацию.

Принципиально не имеет значения ни происхождение сигнала, в том числе и различие между так называемым полезным сигналом и помехой, ни количество различных сигналов, которые способен распознать и различить управляемый объект.

С точки зрения устойчивости важна способность реагировать на сигнал, рассматриваемый как возмущение. Эта способность зависит от интенсивности возмущения и меры инерционности управляемого объекта, т. е. способности сопротивляться возмущению. Эту меру инерционности можно рассматривать как запас устойчивости системы.

Как правило, при большем запасе устойчивости требуется большая интенсивность возмущения для пересечения сепаратрисы, отделяющей движения затухающие от незатухающих, а при одном и том же запасе устойчивости большее возмущение вызывает медленное затухающее движение (если в процессе этого движения не произошло пересечение сепаратрисы или хотя бы ее достижение).

Примерами подобных сепаратрис могут служить круговая

орбита движущегося с 1-й космической скоростью спутника планеты, отделяющая спиральные траектории, по которым тело падает (хотя бы и после нескольких оборотов) на планету, от эллиптических орбит, и параболическая траектория тела, движущегося со 2-й космической скоростью, отделяющая эллиптические траектории спутников от незамкнутых траекторий тел, покидающих при своем движении область пространства, где определяющим для их движения является тяготение планеты.

Для систем, способных реагировать более чем на один сигнал-возмущение, запас устойчивости различен по отношению к различным возмущениям. Так, испарение с водной глади сильно изменяется при изменении температуры и сравнительно мало зависит от количества растворенных в воде солей, а реакция публики в переполненном театре на тихий возглас «пожар!» значительно энергичнее, чем на громкие аплодисменты.



# Интересно полезно знать

Рассмотрим дозировочный автомат, который должен каждую секунду подавать некоторое количество  $a$  жидкости (линия 1 на рис. 35). Пусть реальная скорость изображается кривой 2. Если автомат дозирует газированную воду, то хотя выплескивание лишнего стакана в момент времени  $t_0$

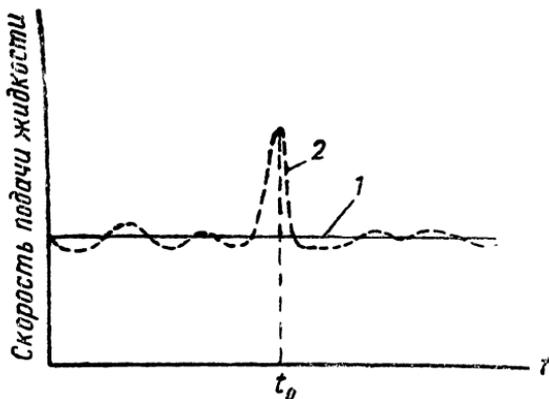


Рис. 35.

и неприятно, но, вообще говоря, площадь между линиями 1 и 2 является подходящей мерой неустойчивости работы автомата. Ввиду узости пика вблизи момента  $t_0$  выплеск даже удвоенной дозы не очень сильно увеличивает меру неустойчивости. Если же автомат подает топливо в ракетный двигатель, то в момент времени  $t_0$  произойдет взрыв и нам будет совершенно безразлично, что в другие моменты времени линии 1 и 2 шли близко друг от друга. Считать такой ракетный двигатель работающим устойчиво невозможно. В данном случае мерой устойчивости или неустойчивости может служить только максимальная величина разности между значениями линий 1 и 2 за все время работы автомата.

На практике приходится постоянно выбирать меру устойчивости и меру близости состояний или процессов в зависимости от конкретных условий задачи.

\* \*  
\*

Некоторые физические характеристики обладают устойчивостью, которую можно назвать *абсолютной* устойчивостью. Такими характеристиками оказываются, в частности, законы сохранения.

Действительно, при тех условиях и в тех пределах, в которых верен закон сохранения энергии (а современная наука не знает пределов, за которыми закон сохранения энергии нарушается), можно утверждать, что никакие возмущения не в состоянии изменить величину суммарной энергии, которой обладает рассматриваемая система. Другими словами, мы не обладаем никакими средствами управлять величиной энергии, которой обладает замкнутая система, т. е. система, не поглощающая энергию извне и не расходующая ее вовне. То же относится и к другим величинам, для которых установлены законы сохранения: к количеству движения и моменту количества движения системы и к так называемым мировым постоянным.

-----  
-----

## О чем рассказывается в этой книге

<b>Введение</b> . . . . .	3
<b>Устойчивость в механике. Колебания и устойчивость</b> . . . . .	6
Свойства движения и их причины . . . . .	6
Колебательные процессы . . . . .	7
Математическое описание колебаний . . . . .	10
Изображение процессов на фазовой плоскости . . . . .	16
Сравнение разных колебательных движений . . . . .	18
<b>Устойчивость движения и управление траекторией</b> . . . . .	21
Устойчивость траектории и ориентация тела . . . . .	21
Устойчивость и управляемость . . . . .	25
Система управления и управляемый объект . . . . .	26
Управление траекторией . . . . .	27
<b>В преддверии строительной механики</b> . . . . .	30
Устойчивость сжатых элементов конструкции . . . . .	30
Флаттер . . . . .	33
Реверс . . . . .	34
Дивергенция . . . . .	36
<b>Устойчивость климата и погоды</b> . . . . .	37
Единство законов природы . . . . .	37
Температура и атмосферное давление . . . . .	38
Управление климатом . . . . .	40
Теплопередача и демпфирование температуры . . . . .	45
Устойчивость погоды . . . . .	46
<b>Устойчивость в химии. Энергия и устойчивость</b> . . . . .	47
Почему в природе много воды . . . . .	47
Устойчивость растворов и скорость химических реакций . . . . .	49
Энергия . . . . .	50
Диссипация и первая теорема Кельвина . . . . .	52
О понятии устойчивости и второй теореме Кельвина . . . . .	52
Третья теорема Кельвина и неустойчивые состояния . . . . .	55
Устойчивость и химическая активность . . . . .	58
<b>Устойчивость в живой природе</b> . . . . .	59
Природа в роли конструктора . . . . .	59
На границе биологии и химии . . . . .	61
Устойчивость вида . . . . .	64
Физиологическая устойчивость организма и демпфирование в живой природе . . . . .	66

Ширина диапазона устойчивых состояний . . .	67
Устойчивость коллективов живых существ . . .	69
<b>Устойчивость и ее место в движениях мыслящей материи</b> . . .	<b>72</b>
О некоторых свойствах некоторых ошибок . . .	72
Дискуссия о пословице «Только дураки никогда не меняют свое мнение». . . . .	73
О мышлении и образовании . . . . .	75
Устойчивость и управляемость психики . . . . .	76
Объем информации и ее сохранность . . . . .	78
Устойчивость опознавания . . . . .	80
Устойчивость систематизированных знаний . . . . .	82
Устойчивость господствующих мнений и граждан- ское мужество . . . . .	85
<b>Заключение</b> . . . . .	<b>86</b>
Об общем определении понятия «устойчивость» . . . . .	86
Устойчивость и кибернетика . . . . .	89
Интересно, полезно знать . . . . .	91

Автор  
**ЛЕОНИД АЛЕКСАНДРОВИЧ ЧУЛЬСКИЙ**

Редактор *И. Б. Шустова*  
Худож. редактор *Т. И. Добровольнова*  
Техн. редактор *А. С. Ковалевская*  
Корректор *Е. А. Ольховская*  
Обложка *Л. И. Ковиссера*

---

Сдано в набор 23/IV 1965 г. Подписано к печати 28/V 1965 г. Изд. № 149.  
Формат бум. 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. л. 3,0. Печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 5,43.  
A10128. Цена 18 коп. Тираж 10 500 экз. Заказ 1486.  
Опубликовано тем. план 1965 г. № 280.

Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

---

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

**ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ  
НА НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ БРОШЮРЫ  
ИЗДАТЕЛЬСТВА «ЗНАНИЕ»  
«НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Факультеты:**

**Естественнонаучный  
Технико-экономический  
Сельскохозяйственный  
Литературы и искусства  
Правовых знаний  
Педагогический  
Здоровья**

помогут слушателям народных университетов овладеть основами наук. Доступность и простота изложения делает эти брошюры ценным пособием для самостоятельной работы.

Среди авторов — видные советские ученые академики Н. Н. Аничков, В. С. Немчинов, члены-корреспонденты АМН СССР А. А. Смородинцев, В. Н. Мошков, Ф. В. Шибанов, П. А. Петрищева, член-корреспондент ВАСХНИЛ А. Г. Вологдин, доктора наук В. А. Веников, А. И. Денисов, О. В. Козлова; известные педагоги Н. Т. Долинина, И. Г. Овчинникова; критик-литературовед Л. Т. Мотылева, искусствоведы, писатели, журналисты общественные и политические деятели.

Подписная цена:

На 3 месяца	— 45 коп.
На 6 месяцев	— 90 коп.

В каталоге «Союзпечати» на 1965 год эти брошюры помещены под индексом 70057—70063.

18 коп.

Индекс  
70057

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»  
Москва 1965