**Вездесущие неустойчивости**

П. Демин

Если физическая система находится в равновесии, знать один этот факт недостаточно, чтобы предсказать ее поведение. Необходимо выяснить устойчиво ли равновесие, нарушается оно или нет при случайных внешних воздействиях, которых в природе не избежать. В физике сталкиваются с неустойчивостями разного типа и различной природы. Поведение неустойчивых систем интересней и неожиданней поведения устойчивых систем: зачастую неустойчивость приводит не просто к потере равновесия, но к проявлению качественно новых физических эффектов – например, к переходу вещества из одного состояния в другое или к самопроизвольному зарождению порядка в хаотической среде. Некоторые виды неустойчивости можно изучать на простых опытах.

Легко наблюдать развитие неустойчивости при нагревании током тонкой проволоки. Количество тепла, выделяющееся на данном участке проволоки, прямо пропорционально его сопротивлению, а сопротивление металла растет с повышением его температуры, что вызывает еще больший нагрев. Такая положительная обратная связь приводит к неравномерности накала: если в какой-то точке проволока случайно нагреется сильнее, то сопротивление там возрастет и тепла выделится больше, чем в соседних местах (общее сопротивление проволоки изменится слабо, ток через нее можно считать прежним). Дополнительное тепло еще сильней нагреет горячий участок проволоки, так что разница температур будет нарастать и нарастать.

Для опыта возьмите волосок перегоревшей лампочки мощностью 40 или 60 ватт и батарейку напряжением 4,5В. Положив волосок на лист белой бумаги, коснитесь его краев проводами, подключенными к батарее. Постепенно сдвигая провода и уменьшая длину включенной в цепь части волоска, найдите такое положение, при котором волосок раскалится докрасна. Вы заметите, что он раскалится не весь, а лишь на некоторых участках – чаще всего в местах изгиба, где вольфрам деформирован и уже обладает повышенным электрическим сопротивлением. Следы раскаленных участков останутся на бумаге в виде темных подпалин.

Может возникнуть вопрос: почему такая неустойчивость не проявляется в обычных электрических цепях? Почему не раскаляются отдельные части шнура от утюга или телевизора? И почему волосок не расплавляется – ведь его температура, непрерывно повышаясь, должна в конце концов превысить температуру плавления? Оказывается, кроме рассмотренной положительной обратной связи, имеется и стабилизирующая отрицательная обратная связь: чем сильней нагревается проволока, тем быстрей она отдает тепло окружающему воздуху, поскольку скорость теплообмена между телами пропорциональна разности их температур. Если скорость выделения тепла в проволоке невелика по сравнению со скоростью теплообмена, температура повышаться не будет. Именно поэтому обычная проволока не нагревается. А в опыте с волоском тепло уже не успевает рассеяться. Если витки провода сдвинуть достаточно близко, протекающий через волосок ток заметно увеличится, и волосок перегорит в той точке, которая была раскалена больше всего.

Другой вид неустойчивости проявляется в опытах с равноплечим сифоном – трубкой, с помощью которой воду переливают через стенку сосуда в другой сосуд, расположенный ниже. Изготовить сифон можно из любой гибкой трубки. Чтобы она сохраняла форму, вставьте в нее по всей длине кусок медной проволоки. Согните трубку точно посредине в виде буквы Л и опустите ее одним концом в кастрюлю с водой. Если через другой конец отсосать из трубки воздух, вода сама потечет через сифон. Это нетрудно объяснить, рассмотрев небольшой объем воды у вершины сифона А. Со стороны кастрюли на него действует давление P1 которое меньше атмосферного Pатм на давление столба воды высотой h1 от вершины сифона до уровня воды в кастрюле: P1=Pатм–Pgh1. С внешней стороны на этот же объем действует давление P2, которое можно определить по аналогичной формуле P2=Pатм–Pgh2, здесь h2 – высота столба воды во внешнем колене сифона. Поскольку h1 меньше h2, давление P1 с внутренней стороны больше давления P2 с внешней, и эта разность давлений приводит воду в движение.

Рис. 1. Опыт с равноплечим сифоном: а) работа сифона; б) возникновение неустойчивости; в) W-образный сифон

Если, зажав пальцем отверстие сифона, вертикально вынуть его из воды, давление в точке А с обеих сторон станет одинаковым. Однако вода сразу же вытечет, едва вы уберете палец: равновесие воды в таком сифоне неустойчиво. Действительно, предположим, что по случайным причинам вода в одном колене чуть-чуть понизилась, а в другом соответственно поднялась. Тогда у вершины сифона, как и в прошлом случае, возникнет разность давлений, направленная в сторону колена, где вода опустилась. Вода движется дальше, разность давлений растет, и сифон опорожняется с все возрастающей скоростью.

Загните небольшие участки на концах трубки вверх так, чтоб сифон стал W-образным. Если теперь наполнить его водой и вынуть, вода останется в трубке – равновесие стало устойчивым. При случайном движении воды давление с той стороны, куда она течет, становится уже не меньше, а больше, чем с противоположной, и разность давлений возвращает воду на прежнее место. Такой сифон удобен при многократном переливании воды – из него не нужно отсасывать воздух при каждом погружении, достаточно сделать это лишь в первый раз.

На примере W-образного сифона видно, что устойчивость имеет свои пределы: система, устойчивая при небольшом отклонении от равновесия, может потерять устойчивость, если отклонение от равновесия слишком велико. Так, стоит воде в одном из колен подняться выше уровня среза трубки Б, и устойчивость исчезнет.

Это нетрудно проверить, осторожно вдувая воздух в один из концов сифона.

Поначалу от вас потребуется небольшое усилие, вода будет «сопротивляться», но в некоторый момент «сопротивление» исчезнет, и вода выльется полностью, даже если вы прекратите вдувать воздух.

Эффектный опыт, Показывающий, как неустойчивость приводит к образованию определенной структуры, можно провести с десятком иголок. Необходимо намагнитить их в одинаковом направлении, скажем, прикладывая ушко к северному полюсу подковообразного магнита, а острие – к южному. (Если у вас нет подковообразного магнита, воспользуйтесь самодельным электромагнитом. Изолированный провод намотайте в несколько слоев на бумажную трубку и, подключив концы этой катушки к батарейке, поместите внутрь иголки). Иголки воткните в небольшие кусочки пробки или пенопласта, покрытые парафином, – получатся магнитные поплавки. Опустите их в стакан с водой. Поскольку одноименные полюса магнитов отталкиваются, а иголки ориентированы одинаково, поплавки расплывутся в разные стороны, стремясь максимально удалиться друг от друга – при этом энергия всей системы наименьшая. Поплавки образуют правильные фигуры: три поплавка – равносторонний треугольник, четыре – квадрат, пять – пятиугольник. Если поплавков много, устойчивыми будут несколько конфигураций – один поплавок находится в центре, остальные рассредоточены по краю стакана. Понятно, что такой рисунок не могут образовать два или три поплавка. А при каком наименьшем их числе структура с поплавком в центре будет устойчивой? Попробуйте определить это на опыте.

Рис. 2. Распределение магнитных поплавков

Если зажженную свечу поставить на дно высокого узкого сосуда, то можно наблюдать процесс упорядочивания потоков воздуха. Для этого достаточно, опустив в сосуд Т-образную перегородку из картона, разделить его пополам (нижний край перегородки должен находиться на несколько сантиметров выше пламени).

|  |
| --- |
| Рис. 3. Лампа-насос |

Через некоторое время картон начнет тлеть, сосуд наполнится дымом и станет хорошо видно, что с одной стороны перегородки струи горячего воздуха и дыма поднимаются вверх, а с другой – течет вниз свежий холодный воздух. Если вынуть перегородку, два эти потока смешаются, их движение станет совершенно беспорядочным. Но стоит опустить перегородку на место, и они вновь разделятся. Когда свеча и перегородка стоят точно по центру, нельзя заранее сказать, по какой части сосуда поток пойдет вверх, а по какой вниз – это зависит от случайного распределения потоков в сосуде в первый момент времени. Опыт хорошо получается со стеклом от керосиновой лампы.

Слова «упорядочивание», «самоорганизация» стали появляться на страницах научных журналов в 70-х годах XX столетия. Возникла новая область исследований, затрагивающая различные науки и посвященная процессам самоорганизации – синергетика. Синергетика изучает нелинейные системы, то есть системы, которые могут очень резко изменять свои характеристики, поскольку величина их отклика на внешнее воздействие непропорциональна величине самого воздействия. Большинство систем, обладающих неустойчивостью, нелинейны – при сколь угодно малом отклонении от равновесия они переходят в другое, устойчивое состояние, значительно отличающееся от прежнего. Вообще говоря, серьезный синергетический эксперимент требует достаточно сложной аппаратуры и расчетов на ЭВМ, но познакомиться с синергетикой можно и на кухне.

Для этого достаточно иметь сковороду, немного масла и какой-нибудь мелкий порошок, чтобы было заметно движение жидкости. Нальем в сковороду масло с размешанным в нем порошком, например тальком или жидкий мучной клейстер, и будем подогревать ее снизу.

Рис. 4. Ячейки Бенара, возникающие в подогреваемом слое жидкости

Если дно сковороды плоское и мы ее нагреваем равномерно, то можно считать, что у дна и на поверхности поддерживаются постоянные температуры: снизу – T1, сверху – Т2. Пока разность температур невелика, частички порошка неподвижны, а следовательно, неподвижна и жидкость. Будем плавно увеличивать температуру. С ростом разности температур наблюдается все та же картина, но выше определенного предела вся среда разбивается на правильные шестигранные ячейки, в центре каждой из которых жидкость движется вверх, по краям – вниз. Если взять другую сковороду, то можно убедиться, что величина возникающих ячеек практически не зависит от ее формы и размеров. Этот замечательный опыт впервые был проделан Бенаром в начале нашего века, а сами ячейки получили название ячеек Бенара. Процесс упорядочивания конвективных потоков в некоторую структуру является типичным примером синергетического явления. Если вы привыкли пить кофе или чай горячим, то могли заметить узоры на их поверхности. Происхождение этих узоров аналогично происхождению ячеек Бенара.

Приглядитесь повнимательней к физическим явлениям, происходящим вокруг, и вы наверняка обнаружите много других интересных примеров неустойчивых систем – от снежной тучи в зимнем небе до новогодней елки, которую с одной стороны перегрузили игрушками.

**Список литературы**

Наука и жизнь. 1985. №12.

Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1988.