

# Г Л А В А I

## ТЕМПЕРАТУРА

\* \*

### § 1. Температура и термодинамическое равновесие

1. Понятие *температуры* вводится для характеристики различной *степени нагретости тел*. Представление о температуре, как и представление о силе, вошло в науку через посредство наших чувственных восприятий. Наши ощущения позволяют различать качественные градации нагретости: *теплый, холодный, горячий* и пр. Однако количественная мера степени нагретости, пригодная для науки, не может быть установлена с помощью чувственных восприятий. Ощущения субъективны. В зависимости от состояния руки одно и то же тело на ощупь может казаться либо теплым, либо холодным. Погрузим, например, одну руку в горячую, а другую в холодную воду и подержим их там в течение некоторого времени. Затем обе руки опустим в воду с комнатной температурой. Тогда первая рука почувствует холод, а вторая тепло. Все испытывали неприятное ощущение холода при медленном вхождении в холодную воду во время купания, быстро исчезающее и сменяющееся чувством бодрости и удовольствия после того, как в результате полного погружения в воду тело купающегося немного охладится. Чувственная оценка температуры сильно зависит от *теплопроводности* тела. Например, при оценке на ощупь металлические предметы в комнате кажутся холоднее деревянных. Если же их нагреть до одной и той же температуры, превышающей температуру руки, то соотношение будет обратным. Чувственная оценка температуры применима только в весьма узком температурном интервале. Она не годится в случае очень горячих и очень холодных тел. Ничего хорошего не получится при попытке определить на ощупь степень нагретости расплавленного железа или жидкого воздуха.

2. В основу количественного определения температуры и построения точной температурной шкалы должны быть положены объективные физические явления и факты, свободные от субъективизма чувственных восприятий. К понятию температуры можно подходить с различных точек зрения. В феноменологическом учении о теплоте температура вводится через понятие *теплового* или *термического равновесия*. Более общим является понятие *термодинамического равновесия*. Как то, так и другое трудно поддаются логическому определению. К ним приходят в результате рассмотрения конкретных примеров и последующего обобщения.

Если два тела, температуры которых при оценке с помощью наших органов чувств сильно отличаются друг от друга (например раскаленный металл и холодную воду) привести в соприкосновение друг с другом, то опыт показывает, что одно тело будет нагреваться, а другое охлаждаться, пока не прекратятся в системе всякие макроскопические изменения. (Мы предполагаем, что соприкасающиеся тела химически не реагируют друг с другом.) Тогда, применяя терминологию, заимствованную из механики, говорят, что эти два тела находятся в *термодинамическом равновесии* друг с другом и имеют *одинаковые температуры*. Термодинамическое равновесие, как показывает опыт, в конце концов наступает не только в случае соприкосновения двух, но и в случае соприкосновения скольких угодно тел. Если соприкасающиеся тела химически реагируют друг с другом, то в результате химических реакций может происходить дополнительное нагревание или охлаждение. Но после прекращения химических реакций в конце концов устанавливается термодинамическое равновесие, при котором никаких макроскопических процессов уже не происходит.

3. Отмеченные факты допускают обобщение. Назовем *изолированной* или *замкнутой системой* систему тел, которые не могут обмениваться энергией с окружающими телами. Такая система есть идеализация и в действительности точно никогда не реализуется. Даже в тех случаях, когда вблизи соприкасающихся тел никаких других тел не имеется, тела все же не образуют замкнутую систему, так как они непрерывно испускают лучистую энергию и поглощают излучение, исходящее от других удаленных тел. Однако искусственными приемами можно создать такие условия, когда обмен энергией системы с другими телами станет пренебрежимо малым. Этого можно достигнуть путем заключения системы в твердую *теплопроводящую* или *адиабатическую оболочку*, т. е. такую оболочку, что состояние системы, помещенной внутри нее, не меняется при нагревании или охлаждении тел, находящихся вне оболочки (подробнее см. § 13). Адиабатическая оболочка является физической абстракцией. Таких оболочек в действительности не существует, но можно создать оболочку, по своим свойствам приближающиеся к адиабатическим. Наиболее совершенными адиабатическими оболочками в современной физике и технике являются стенки *сосудов Дьюара* или *термосов*. Это стеклянные или металлические баллоны с двойными стенками, между которыми создан высокий вакуум. Они хорошо предохраняют помещаемые в них тела от воздействия температур внешних тел. Идеализируя подобные приборы, мы приходим в пределе к представлению об идеальной адиабатической оболочке. Тело, заключенное в адиабатическую оболочку с твердыми стенками, при условии, что внешние силовые поля поддерживаются постоянными, полностью защищено от внешних воздействий, т. е. является изолированной системой.

Обобщение, о котором говорилось выше, заключается в следующем. *Каково бы ни было начальное состояние тел изолированной системы, в ней в конце концов установится термодинамическое равновесие, в котором прекратятся все макроскопические процессы.* Это положение играет важную роль в термодинамике и принимается в ней за постулат, иногда называемый *общим началом термодинамики*.

4. Приведем еще несколько примеров на установление термодинамического равновесия. Допустим, что жесткая теплопроводящая оболочка разделена также теплопроводящей перегородкой на две части. В одной из частей находится жидкость, в другой создан вакуум. Быстро удалим перегородку. Жидкость закипит. В пространстве, ограниченном оболочкой, возникнет сложное движение жидкости и ее пара. Но в конце концов оно, а также дальнейшее испарение жидкости прекратятся. Получится либо только один пар (если жидкости вначале было мало), либо система, состоящая из жидкости и насыщенного пара. В обоих случаях конечное состояние термодинамически равновесно. Это не есть состояние абсолютного покоя, в котором прекращаются все без исключения процессы. Рассматриваемое с молекулярной точки зрения, оно характеризуется непрерывным и интенсивным обменом молекулами между жидкостью и паром. Это значит, что непрерывно идет процесс испарения жидкости и обратный ему процесс конденсации пара в жидкость. Однако в состоянии термодинамического равновесия эти два процесса в среднем как бы компенсируют друг друга: среднее число испаряющихся молекул равно среднему числу молекул, возвращающихся обратно из пара в жидкость. Термодинамическое равновесие, таким образом, может быть охарактеризовано как *динамическое равновесие*, когда весьма интенсивно идут процессы молекулярного масштаба, но все макроскопические процессы прекращаются. Это относится ко всякому термодинамическому равновесию, а не только к равновесию, рассмотренному в приведенном примере.

Если в стакан с водой бросить кусок сахара, то начальное состояние системы будет термодинамически неравновесным — сахар начнет растворяться в жидкости. Однако по прошествии некоторого времени, когда процесс растворения прекратится, возникнет термодинамически равновесное состояние, в котором получится либо однородный раствор, либо неоднородная система, состоящая из куска сахара и окружающего его насыщенного раствора. В последнем случае динамический характер равновесного состояния проявляется в том, что процесс растворения сахара, если его рассматривать с молекулярной точки зрения, никогда не прекращается. Однако в состоянии равновесия он компенсируется обратным процессом кристаллизации сахара из раствора.

5. Самопроизвольный процесс перехода системы в состояние термодинамического равновесия называется *релаксацией*, а время,

затрачиваемое на такой переход, — *временем релаксации*. Время релаксации относится к числу нечетко определенных понятий. При его измерении никогда не дожидаются момента, когда наступает полное термодинамическое равновесие. Вместо этого измеряют время, по истечении которого система переходит в какое-то неравновесное состояние, которое, однако, с требуемой точностью может быть принято за равновесное. Это время и принимают за время релаксации. Таким образом, во всех случаях речь идет не о точном определении времени релаксации, а о его приближенных оценках.

6. Термодинамическое равновесие предполагает, что тела, приводимые в контакт, находятся также в *механическом* и *химическом* равновесии друг с другом. Это означает, в частности, что давления в обоих телах одни и те же, и тела при контакте химически не реагируют между собой. Если это не так, то тела можно отделить одно от другого абсолютно жесткой теплопроводящей оболочкой, химически не реагирующей ни с одним из рассматриваемых тел. Примером теплопроводящей оболочки может служить тонкая фольга из химически нейтрального металла. Такая оболочка, ввиду ее тонкости, не влияет существенно на физическое состояние тел. Однако она не препятствует обмену энергиями между контактирующими телами. Поэтому при контакте тел через разделяющую их абсолютно жесткую теплопроводящую перегородку в конце концов должно наступить равновесие, при котором обмен энергией между телами прекращается. При этом в отсутствие перегородки механического и химического равновесия между телами может и не быть. В этом случае говорят, что тела находятся в *тепловом* или *термическом равновесии* между собой или имеют *одинаковые температуры*.

Таким образом, по определению, два тела находятся в тепловом равновесии друг с другом или имеют одинаковые температуры, если при приведении их в тепловой контакт через разделяющую абсолютно жесткую теплопроводящую оболочку равновесие не нарушается. (Оболочка не нужна, если тела находятся в механическом и химическом равновесии друг с другом). Если же тепловое равновесие при контакте не получается и для его достижения требуется время, то говорят, что температуры тел до контакта были разные. Это определение освобождает понятие температуры от субъективизма, свойственного температуре, вводимой с помощью наших ощущений. Подчеркнем, что температура относится к величинам, которые зависят только от *внутреннего состояния тела*.

Во всем дальнейшем подразумевается, что приводимые в контакт тела, если они химически реагируют друг с другом, заключены в тонкие теплопроводящие оболочки, препятствующие этим химическим реакциям.

7. Температура есть одна из *макроскопических характеристик* состояния тел. Это понятие не имеет смысла для систем, состоящих из одного или небольшого числа атомов и молекул. Хотя оно строго

применимо только для систем, находящихся в термодинамическом равновесии, однако им постоянно пользуются также и в тех случаях, когда полного термодинамического равновесия еще нет. Говорят, например, о неравномерно нагретых телах, разные точки которых имеют разные температуры. Это возможно потому, что время релаксации уменьшается с уменьшением размеров системы. Разобьем мысленно неравновесную систему на достаточно малые макроскопические части. Ввиду малости времен релаксации таких частей каждая из них быстро придет практически в состояние термодинамического равновесия. Это значит, что если такую малую часть мгновенно заключить в твердую адиабатическую оболочку, то ее состояние практически окажется равновесным и не будет меняться с течением времени. Поэтому и можно говорить о температурах таких малых частей. Система в целом при этом не находится в термодинамическом равновесии — происходит медленный процесс выравнивания температур ее различных частей. Но могут быть и такие сильно неравновесные состояния, что разделение системы на малые макроскопические части, практически являющиеся равновесными, невозможно. К таким состояниям понятие температуры не применимо.

## § 2. Термоскоп и температурные точки

1. Для суждения об одинаковости или различии температур двух тел  $A$  и  $B$  нет необходимости обязательно приводить их в тепловой контакт друг с другом. Можно воспользоваться для этой цели третьим телом  $C$ , приводимым последовательно в контакт с телами  $A$  и  $B$ . Этот способ имеет то преимущество, что он позволяет сравнивать температуры и в том случае, когда тела  $A$  и  $B$  реагируют друг с другом химически, не используя при этом теплопроводящих перегородок. В основе его лежит следующий опытный факт.

Если тело  $C$  находится в тепловом равновесии с телами  $A$  и  $B$ , то тела  $A$  и  $B$ , приведенные в контакт друг с другом, также будут находиться в тепловом равновесии. Иными словами, если температура тела  $C$  равна температурам тел  $A$  и  $B$ , то тела  $A$  и  $B$  имеют одну и ту же температуру, равную по определению температуре тела  $C$ .

Допустим теперь, что тело  $C$  настолько мало, что при приведении в контакт с телами  $A$  и  $B$  оно не меняет заметно температуры этих тел, хотя изменения температуры самого тела  $C$  и могут быть значительными. Такое тело  $C$  может служить «пробным телом», с помощью которого можно констатировать одинаковость или различие температур тел  $A$  и  $B$ . Приведем тело  $C$  в контакт с телом  $A$  и подождем, пока не наступит тепловое равновесие между ними. Тело  $C$  примет температуру тела  $A$ , тогда как температура последнего практически останется неизменной. Затем приведем тело  $C$