

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОНЯТИЯ ТЕМПЕРАТУРА В ФИЗИКЕ

М.К.Карипова

Кыргызский национальный университет им. Ж.Баласагына, г. Бишкек

Понятие «температура» - фундаментальное понятие не только физики, но и естествознания в целом. Это сложное понятие, оно отражает многогранность физических понятий. Понятие температура вошло в физику из бытовых представлений теплого и холодного посредством нашего чувственного восприятия степени нагретости тел. Однако наши ощущения неоднозначны и зависят от состояния человека и окружающей среды. Так, например, в одной и той же в комнате металлические предметы кажутся всегда более холодными, чем деревянные и пластмассовые.

В физике к понятию температура приходят через понятие теплового равновесия. Пусть два тела, имеющие разные температуры (горячая и холодная вода) приходят в соприкосновение. Опыт показывает, что одно тело при этом будет нагреваться, а другое тело охлаждаться пока не прекратятся всякие видимые изменения. Тогда говорят, что эти два тела находятся в тепловом равновесии и имеют одинаковые температуры.

Итак, температура – это макроскопическая, термодинамическая величина, определяющая степень нагретости тела. При термодинамическом равновесии температура системы не меняется, она остается постоянной сколько угодно долго, поэтому температуру можно определять, как величину позволяющую описывать тепловое равновесие. Таким образом, температура - физическая величина, характеризующая состояние теплового равновесия системы, при котором температура во всех частях системы остается постоянной.

Кинетическая энергия и температура. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории связывает давление газа с кинетической энергией молекул идеального газа: $P = \frac{2}{3} n \frac{m\bar{v}^2}{2}$, где P – давление газа, n - количество молекул в 1см^3 (плотность газа), m - масса молекулы, \bar{v}^2 - среднее арифметическое значение квадратов скоростей молекул. Из уравнения Клапейрона – Менделеева определим давление $P = \frac{1}{V} RT$. Это значение P подставим в уравнение молекулярно – кинетической теории:

$$RT = \frac{2}{3} \frac{m\bar{v}^2}{2} N_A, \text{ где } nV = N_A \text{ число Авогадро. Обозначим } \frac{R}{N_A} = K, \text{ то } \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT (*),$$

k - постоянная Больцмана.

Формула (*) показывает, что температура служит мерой кинетической энергии молекул. Необходимо подчеркнуть, что кинетическая энергия $\frac{m\bar{v}^2}{2}$ - среднестатистический параметр; он характеризует совокупность молекул, причем, температура T также относится к совокупности молекул, поэтому нельзя говорить о температуре одной молекулы. Таким образом, средняя кинетическая энергия движения молекул и температура одинаково характеризуют процесс перехода к тепловому равновесию: средняя кинетическая энергия - микроскопический, а температура - макроскопический. Таким образом, эти величины взаимосвязаны: $\bar{E} \sim T$. Выше было показано, что понятие температуры как мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул введено как следствие основного уравнение кинетической теории газов. Определяя температуру как величину пропорциональную средней кинетической энергии молекул, следует иметь в виду, что такое определение ограничивается рамками классической теории. В квантовой статистике, где не выполняется теорема Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы, это определение не приемлемо. Поэтому приведенное определение не является полным и не может быть принято в качестве основного.

Кроме того, приведенное определение понятия температуры не содержит непосредственного указания на способ ее измерения. Нельзя доказать, что термометр измеряет величину $\frac{m\bar{v}^2}{2}$. Однако связь давления идеального газа $P = nkT$ указывает, что давление газа

прямо пропорционально его абсолютной температуре. Отсюда следует, что о температуре можно судить по значению давления. Такой прибор называется газовым термометром. Измерение температуры газовым термометром оказывается хорошим методом благодаря свойству газов вести себя при малых плотностях почти одинаково, их состояния описываются одним и тем же уравнением состояния. Во времена Карно (начало 18 века) считали, что газы всегда остаются газами. Поэтому газовый термометр до сих пор служит основным прибором для измерений температур, но при низких температурах, близких к абсолютному нулю, и при очень высоких температурах газовые термометры непригодны.

Для измерения T используют зависимость свойства тел (объема, длины, давления) от температуры.

Термометры. Мерой изменения температуры тела может служить изменение какого-либо свойства, зависящего от нее, например объема, электросопротивления и др. Чаще всего для измерения температуры используют изменение объема. На этом основано устройство термометров. Первый термометр был изобретен Галилеем около 1600 г. В качестве термометрического вещества, т.е. тела, расширяющегося при нагревании, в нем использовалась вода. Температуру можно измерять также по расширению газа при постоянном давлении (газовый термометр). Для определения температуры тела термометр приводят в соприкосновение с телом; по достижению теплового равновесия термометр показывает температуру тела.

Разные тела при нагревании расширяются по-разному, поэтому шкала термометра зависит от термометрического вещества. Для практических целей термометры градуируют по точкам плавления или кипения или каким-либо другим, лишь бы процесс происходил при постоянной температуре. Наибольшее распространение имеет стоградусная шкала (или шкала Цельсия). По этой шкале лед плавится при 0°C , а вода кипит при 100°C , а расстояние между ними делится на 100 частей, каждая из которых считается градусом. В бытовых термометрах используется окрашенный спирт или толуол. Жидкостный термометр обычного типа представляет собой очень «умный» прибор.

Термопара. Во многих веществах изменение температуры приводит к изменению их электрических свойств. Один из типов термометров, в которых используются такие изменения, получил название термопары. Две тонкие проволоки из разных металлов свариваются или спаиваются вместе на одном из концов. Свободные концы проводов присоединяются к устройству, измеряющему напряжение. Разность потенциалов между проволоками зависит от разности температуры между вольтметром и спаянными концами. Таблицы зависимости разности потенциалов для различных термопар приводятся в различных справочниках. Используя различные комбинации металлов, можно с помощью термопар измерять температуру в интервале от -269°C до 2300°C .

Термометры на основе электрического сопротивления. Обычно сопротивление металлов растет с увеличением температуры. Этот эффект используется во многих точных термометрах. Обычно берется небольшая проволочная спираль из платины, характеристики которой остаются очень стабильными. Измеряемая температура может меняться от -258°C до 900°C .

Термисторы. Термисторами называют целый класс полупроводников, у которых зависимость сопротивления от температуры противоположна этой зависимости для металлов. Электрическое сопротивление падает с ростом температуры. Термисторы, которые обычно представляют собой окислы металлов, могут изготавливаться в форме крошечных шариков. Они могут быть более чувствительными, чем термопары или платиновые термометры. Термисторы используются в медицинских термометрах с электрическим способом считывания показаний.

Биметаллические полоски. В большинстве бытовых холодильников термометр состоит из двух кусков разных металлов, соединенных вместе. Металлы подбираются таким образом, чтобы один из них при увеличении температуры расширялся гораздо больше другого. Один из используемых для этой цели металлов носит название инвар-это сплав железа с никелем, объем которого меняется очень мало в широком температурном интервале. Термометры с биметаллическими полосками используются в темных комнатах, духовках, домашних холодильниках. Обычно биметаллическая полоска в виде спирали перемещает стрелку, указывающую температуры, и управляет ртутным выключателем, запускающим и останавливающим нагревательную систему.

Пирометры. Пирометры отличаются от других термометров тем, что их чувствительные элементы не находятся в непосредственном контакте с образцом, температура которого измеряется. Пирометрическим методом теоретически возможно измерение сколь угодно высоких температур. В радиационных пирометрах температуру определяют по величине полной энергии излучения, связанной с температурой закона Стефана-Больцмана. В оптических пирометрах температуры образца определяют по монохроматической яркости излучения абсолютно черного тела по закону Планка.

Калибровка термометров. В течение XVII века было сконструировано много типов термометров, основанных на использовании жидкостей в стеклянных трубках причем каждый из них был проградуирован по-разному. По-видимому, никто не измерял температуру с помощью приборов до тех пор, пока в 1592 году Галилей и изобрел воздушный термометр.

В начале XVIII века Габриэль Фаренгейт стандартизировал процедуру изготовления ртутных термометров. Он также выбрал шкалу, которая с небольшими изменениями используется для повседневного измерения температуры в англоязычных странах (США, Англия). В качестве нулевой точки на этой шкале была выбрана наименьшая температура, которую Фаренгейт мог легко воспроизводить в своей лаборатории. Это температура смешанных между собой соли и обыкновенного льда - такая же смесь используется при домашнем изготовлении мороженого. По этой шкале точке плавления обычного льда была приписана температура 32°F , нормальная температура человеческого тела положена равной 96°F . Примерно в те же годы Андерс Цельсий, шведский астроном, предложил поделить температурный интервал между точкой плавления льда и точкой кипения воды на 100 градусов. Образованная таким образом шкала первоначально называлась «стоградусной», но с 1960 года официально известна как шкала Цельсия. Градусы Цельсия входят в качестве основных единиц в международную систему (СИ).

Во Франции пользуются шкалой Реомюра, в которой температура плавления льда 0° , кипения воды 80° . При переводе температуры из одной шкалы в другую прежде возникает вопрос: на сколько градусов температура выше точки плавления льда.

Между точками замерзания и кипения воды размещено 180°F и только 100°C . Это значит, что один градус Фаренгейта соответствует $100/180=5/9$ градуса Цельсия. Наоборот, градус Цельсия равняется $9/5$ градуса Фаренгейта.

В качестве простого примера найдем, чему соответствует по стоградусной шкале 68°F . Прежде всего подчеркнем, что нулевые точки этих двух шкал не совпадают. По шкале Цельсия отсчет ведется начиная от точки замерзания воды (выше 0°). Поэтому сначала от показаний термометра по Фаренгейту вычтем 32° , т.е. $68^{\circ}-32^{\circ}=36^{\circ}\text{F}$. Потом находим стоградусный эквивалент 36°F : $5/9 \cdot 36=20^{\circ}\text{C}$

Перевод показаний термометра по шкале Фаренгейта показания стоградусной шкалы производится по формуле: $T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} [T(^{\circ}\text{F}) - 32]$. И наоборот, перевод показаний стоградусной шкалы на показания шкалы Фаренгейта производится по формуле $T(^{\circ}\text{C}) = 32 + \frac{9}{5} T(^{\circ}\text{C})$.

Абсолютная шкала температур. Согласно формуле кинетической энергии молекул $E_{кин} = \frac{3}{2}kT$ равная нулю температура не соответствует 0°C . Из указанной формулы следует, что $T=0$ при $E_{кин}=0$. А это происходит при гораздо более низкой температуре, чем температура замерзания воды. Поэтому, чтобы пользоваться формулой кинетической энергии молекул газа нужно «переопределить» нулевую точку. Новая шкала температур, 1° которой равен 1°C , называется абсолютной шкалой, или шкалой Кельвина. Эксперимент показывает, что вода замерзает при $T = 273^{\circ}\text{K}$. Следовательно, нулевая точка по шкале Кельвина соответствует -273°C . При этой температуре должно прекратиться всякое движение молекул. (Согласно квантовой теории еще сохраняется «нулевая энергия»). Эта нулевая температура получила наименование абсолютного нуля. Из такого определения температуры как меры молекулярного движения следует, что не могут существовать температуры ниже абсолютного нуля.

Температура в термодинамике. Температура и энтропия (степень беспорядка) взаимосвязаны между собой по формуле: $\frac{1}{T} = \frac{\Delta S}{\Delta Q}$, где S - энтропия, ΔQ - количество теплоты,

внесенное в систему. В равновесном состоянии температура имеет одинаковое значение для всех макроскопических частей системы. Если в системе два тела имеют одинаковую температуру, то между ними не происходит передачи кинетической энергии частицам (тепла). Если же существует разница температур, то тепло переходит от тела с более высокой температурой к телу с более низкой, потому что суммарная энтропия при этом возрастает. Некоторые квантомеханические системы могут находиться в состоянии, при котором энтропия не возрастает, а убывает при добавлении энергии, что формально соответствует отрицательной абсолютной температуре.

Температура в квантовой механике. Из теории Бора следует, что электрон, как и вращающийся волчок, имеет угловой момент, называемый спином. Со спином электрона связан и магнитный момент – электрон ведет себя в магнитном поле, как магнит.

Если электрон находится в постоянном поле, то, согласно правилам квантовой механики, его спин может быть направлен либо по полю – тогда проекция спина на направление поля равна $+1/2\eta$, либо против поля и его проекция равна $-1/2\eta$ (h - постоянная Планка). Отсюда следует, что в магнитном поле электрон может находиться в одном из двух состояний; энергия этих состояний может принимать $\pm \mu_0 H$; где μ_0 - магнетон Бора $\mu_0 = \frac{eh}{2mc}$, H - напряженность магнитного поля.

Переходы из разных шкал

в/из	Кельвин	Цельсий	Фаренгейт
<u>Кельвин</u> (K)	= K	= C + 273,15	= (F + 459,67)/1,8
<u>Цельсий</u> ($^{\circ}\text{C}$)	= K - 273,15	= C	= (F - 32)/1,8
<u>Фаренгейт</u> ($^{\circ}\text{F}$)	= K · 1,8 - 459,67	= C · 1,8 + 32	= F

Сравнение температурных шкал

Описание	Кельвин	Цельсий	Фаренгейт	Ранкин	Delisie	Ньютон	Реомюр
Абсолютный ноль	0	-273.15	-459.67	0	559.725	-90.14	-218.52
Температура замерзания воды	273.15	0	32	491.67	150	0	0
Средняя температура человеческого тела	310.0	36.8	98.2	557.9	94.5	12.21	29.6

Температура кипения воды	373.15	100	212	671.67	0	33	80
Плавление титана	1941	1668	3034	3494	-2352	550	1334
Поверхность Солнца	5800	5526	9980	10440	-8140	1823	4421

Систему электронов с магнитными моментами можно сравнить с идеальным газом. Роль скоростей атомов (их кинетической энергии) здесь играет энергия электрона в магнитном поле. Но кинетическая энергия может принимать любое положительное значение, а энергия в магнитном поле принимает только два значения. В квантовой механике доказано, что тепловое равновесие атомов между собой достижимо.

В условиях теплового равновесия число электронов $n(-1/2)$, имеющих энергию $-\mu_0 H$, будет больше, чем число электронов $n(+1/2)$, которые имеют энергию $\mu_0 H$. Отношение этих чисел называют населенностью уровней. В квантовой механике доказано, что населенность уровней определяется одним параметром T – ее абсолютной температурой. Такое свойство систем было доказано американским физиком Гиббсом в начале XX века.

Спиновая температура. Спиновая температура – величина, характеризующая распределение частиц, обладающих спином, по магнитным подуровням, образующимся при расщеплении их уровней в магнитном поле (Зееман эффект). Спиновая температура может быть не только положительной, но и отрицательной, последней соответствует инверсия населенностей энергетических уровней.

Температура атомных ядер. В 1913 году Н. Бор предложил капельную модель ядра. Для возбуждения ядра необходимо сообщить эту дополнительную энергию ΔE , в результате этого энтропия ядра возрастает на величину $\Delta S = \frac{\Delta E}{T}$, так как увеличение энергии ядра и подвод тепла

к ядру – это одно и то же. В последнюю формулу подставим значение ΔS , получим: $\frac{1}{T} = \frac{\Delta \ln \rho}{\Delta E}$,

т.е. обратная температура равна изменению логарифма плотности уровней с энергией возбуждения. Чем сильнее возбуждение, тем больше плотность уровней и больше температура ядра. Установлено, что температура ядра растет примерно как корень квадратный из энергии возбуждения. Температура ядра показывает, как изменяется плотность уровней с ростом энергии возбуждения.

Температура реликтового излучения. Реликтовое излучение - это космическое излучение, имеющее спектр, характерный для абсолютно черного тела при температуре около $3K$.

Считается, что реликтовое излучение сохранилось с начальных этапов существования Вселенной и равномерно ее заполняет. Экспериментально его существование было подтверждено в 1965 году. По мере расширения Вселенной, космологическое красное смещение вызывало остывание плазмы. В результате дальнейшего остывания излучения за счет красного смещения, его температура сейчас снизилась до $2,725K$.

Температура в астрофизике будучи важнейшей характеристикой теплового движения, которое пронизывает весь мир, включая Галактику и Метагалактику, является одной из основных характеристик, определяющих физическое состояние небесных объектов.

Реальные условия небесных объектов существенно отличаются от термодинамического равновесия, но определение температуры производится при предположениях, что среда находится в термодинамическом равновесии и к ней применимы законы излучения абсолютно черного тела.

Изучение температуры черных дыр позволяет познакомиться с новым механизмом теплового движения. Черная дыра ведет себя как тело с температурой, равной абсолютному нулю. Тогда с помощью черной дыры можно полностью превратить тепло в работу. Это будет похоже на вечный двигатель второго рода. Это приводит к заключению, что черная дыра не может иметь температуру $T=0$.

Если черная дыра имеет температуру, отличную от абсолютного нуля, то она имеет и энтропию. Зная энтропию, можно вычислить и температуру. Но исследования показали, что черная дыра - система неустойчивая, неравновесная, поэтому и понятие о температуре черной дыры – понятие не в полнее точное. Температура черной дыры растет с уменьшением массы. Доказано, что вблизи черной дыры происходит рождение частиц. Рождение частиц приводит к уменьшению массы, а следовательно, и к повышению температуры. С ростом температуры интенсивность излучения увеличивается, и температура возрастает еще больше. В конце концов дыра должна сгореть совсем за конечное время.

Приведенный выше анализ формирования понятия температуры рекомендуется применять при изложении курса общей физики в вузе и в специализированных физико-математических школах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Молекулярная физика, т.2., - М.: Наука, 1989.
2. Смородинский Я.А. Температура. - М.: Наука, 1989.
3. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. - М.: Наука, 1976.