

Проблема координации: Температура как физическая величина

Е. Б. Рудный, ©, 2024, blog.rudnyi.ru/ru

Читать онлайн: <http://blog.rudnyi.ru/ru/2024/10/problema-koordinatsii-temperatura.html>

Теория физики содержит математические уравнения, связывающие физические величины. Например, уравнение состояния идеального газа задает связь между абсолютной температурой (T), давлением (p), объемом (V) и числом молей (n):

$$pV = nRT$$

R — универсальная газовая постоянная. Предполагается, что независимые измерения этих величин для газа в области малых давлений будут удовлетворять такому соотношению. Проблема координации заключается в вопросе, каким образом математическое уравнение в физике связывается с миром, который не является математической структурой.

На первый взгляд ответ кажется очевидным, поскольку измерение физических величин представляется интуитивно понятным. Так, обсуждение проблемы измерения длины не представляется необходимым — длина просто измеряется линейкой; аналогично температура измеряется термометром, а давление манометром. Конечно, требуется выбрать единицы измерения, но не сложно пересчитать полученную величину из одной размерности в другую. Таким образом не должно быть ничего странного в том, что физики открыли зависимость одной физической величины от другой и выразили ее математическим уравнением.

С другой стороны, рассмотрим два связанных вопроса о физической величине Баса ван Фраассена, путем которых он ввел в оборот термин ‘проблема координации’:

- Что можно считать измерением физической величины X ;
- Что такое физическая величина X .

Термометр измеряет температуру, но для понимания смысла этого утверждения требуется сказать, что такое температура без введения в рассмотрение инструмента измерения температуры. Это, в принципе, возможно при опоре на теорию физики, что однако только переводит вопрос о связи между математическими уравнениями в теории физики и миром на новый уровень рассмотрения.

- Математика, физика и измерение
- Измерение температуры в настоящее время
- История термометрии
 - Введение
 - Постоянство температуры реперных точек
 - Неравномерность шкалы — выбор рабочего вещества
 - Температура за пределами границ ртутного термометра
 - Уравнение состояния идеального газа и газовые термометры
 - Температура, теплота и термодинамическая шкала
- Обсуждение

Математика, физика и измерение

Измерительный прибор сконструирован и сделан человеком, но он работает сам по себе. Показание термометра в этом отношении объективно и не зависит от человека, который снимает показание термометра. Таким образом следует более внимательно проследить связь реального термометра в ходе измерения температуры с теорией физики. В общем случае этот вопрос касается отношения между теоретической и экспериментальной физикой. Так, невозможно представить себе развитие физики без связи с экспериментом, но следует понять, в чем в этом случае проявляется зависимость физического эксперимента от теории физики.

Со стороны теории физики связь с измерением выглядит таким образом. Физика отличается от математики тем, что математическим уравнениям сопоставляется мысленная модель, которая придает этим уравнениям физический смысл. На этой основе появляется представление об идеальном инструменте, как о плане построения реального инструмента. Однако должно быть понятно, что реальный инструмент будет тем или иным образом отличаться от идеального плана инструмента согласно теории физики.

Важно отметить возможность измерения одной физической величины разными способами. Например, для измерения температуры используются разные типы термометров: газовые, жидкостные, механические, электронные на основе термопары или терморезистора и оптические. Для каждого из них существует свой прототип идеального инструмента на основе разных теорий физики. В то же время они измеряют одну и ту же физическую величину и ожидается, что правильно калиброванные инструменты дадут одинаковое значение численной величины температуры в пределах погрешности измерения.

Основное отличие работы реального инструмента связано с погрешностями измерения, появление которых обычно остается за рамками теории физики. Некоторые погрешности можно учесть путем введения поправок в проводимые измерения с учетом отклонений реального инструмента от идеала, но ошибки

измерения невозможно свести к нулю. Разговор о ошибках измерения невозможен без введения стандартов, связанных с измерительной шкалой, которая приводит к появлению численных значений физической величины.

Важно не забыть, что физика как наука основана на воспроизводимости экспериментальных результатов в разных лабораториях разными учеными. Развитие физики без этого требования невозможно себе представить. Это подчеркивает важность вопросов стандартизации, без которой невозможно говорить о воспроизводимости работы тех же термометров в разных лабораториях. В свою очередь стандартизация вводит в рассмотрение конвенциональность и таким образом при рассмотрении измерений конвенциональность, конструктивизм и объективность оказываются тесно связанными друг с другом.

Понимание утверждения о температуре объекта равной, например, 396.54 ± 0.12 К, требует знания температурной шкалы, процедуры измерения и процедуры калибровки данного термометра. Отмечу, что международная шкала температур по ходу времени менялась, поэтому важно знать, в каком году было сделано это измерение и какая версия стандарта в нем использовалась. Не исключено, что потребуется скорректировать приведенное значение температуры для перехода к текущей версии международной шкалы температур.

Ниже вопрос измерения физической величины будет рассмотрен на примере температуры. Я начну с современной точки зрения на термодинамическую шкалу температур. Это будет взгляд на проблему координации с точки зрения сложившейся теории физики. После этого я рассмотрю историю термометрии, что даст нам взгляд на проблему координации в ходе становления соответствующей теории. В последующем обсуждении эти взгляды будут сопоставлены между собой.

Измерение температуры в настоящее время

При рассмотрении температуры есть две мысленных модели, связанных с использованием теории физики на разных уровнях рассмотрения термометра. Начну с молекулярно-кинетической теории, где температура обычно связывается со средней кинетической энергией молекул; в такой форме это однако мало что дает для практики измерения температуры. Следует вспомнить, что эта связь выполняется лишь для равновесного состояния системы; поэтому более правильный взгляд на температуру на этом уровне связан с достижением распределения по энергии Максвелла-Больцмана в равновесном состоянии. Нельзя забывать, что произвольная конфигурация молекул температурой не обладает — температура устанавливается в процессе так называемой термализации, в ходе которой состояние молекул описывается распределением Максвелла-Больцмана.

Использование термометра также предполагает достижение теплового равновесия между термометром и изучаемой системой. Поэтому необходимый

мысленный образ измерения температуры на уровне молекулярно-кинетической теории следующий: в термометре и в изучаемой системе установилось свое распределение Максвелла-Больцмана, а параметры этих двух распределений, называемые температурой, совпадают между собой. Именно такое представление будет правильным мысленным образом на уровне молекулярно-кинетической теории. Правда, такая мысленная модель также мало поможет создать образ идеального инструмента для измерения температуры.

Поэтому рассмотрение температуры более правильно вести на уровне теории физики континуума. В данном случае температура вводится в нулевом законе термодинамики как величина для описания теплового равновесия, которое устанавливается между двумя системами. В этом состоянии температуры двух систем равны, при этом температура обладает свойством транзитивности. Если последовательное измерение термометром двух разных систем показывает то же самое значение температуры, то температуры этих систем совпадают. Такая формулировка закона достаточна для объяснения возможности измерения температуры.

Многим кажется, что такая формулировка не отвечает на вопрос, что такое температура и именно поэтому обычно добавляется сведения о температуре как средней кинетической энергией молекул. Однако, как рассмотрено выше, более правильный образ температуры на этом уровне связан с параметром распределения Максвелла-Больцмана. Либо мы переходим на уровень молекулярно-кинетической теории и пробираемся сквозь все сложности статистического рассмотрения поведения молекул, либо следует принять, что нулевой закон термодинамики дает исчерпывающий ответ на вопрос, что такое температура. Проблема в том, что смешение мысленных образов на разных уровнях между собой может привести к ложным ожиданиям, поскольку сопоставление мысленных образов на разных уровнях рассмотрения оказывается не такой простой задачей.

Температура влияет на разные свойства вещества и это дает возможность для создания разных термометров. Я остановлюсь только на газовом и жидкостном термометрах, поскольку газовый термометр непосредственно связан с термодинамической шкалой температур; а также газовый и жидкостный термометры сыграли основную роль в становлении термометрии. Мысленная модель обоих термометров связана с постулатом о существовании термического уравнения состояния; в случае постоянства массы и состава математическая запись выглядит таким образом $f(p, V, T) = 0$.

Вещество может находиться в разных фазовых состояниях — твердом, жидком и газообразным. Также требуется проведение различия между чистыми веществами и растворами. Их отличает поведение в ходе фазового перехода — плавлении и испарении. Для чистых веществ температура фазового перехода остается постоянной, поэтому их можно использовать в качестве реперной точки для калибровки термометров. Фазовый переход раствора связан с

изменением состава, поэтому поведение является более сложным. Теория фазовых диаграмм дает ответ на эти вопросы.

Термическое уравнение состояния, введенное выше, используется для вещества без изменения фазового состояния. В этом случае вещество расширяется при нагревании и сжимается при охлаждении; таким образом объем системы или давление системы может служить индикатором температуры. Важно только не забыть, что с температурой связаны как объем, так и давление.

Термическое уравнение состояния позволяет ввести практическую шкалу температур; в данном случае самый наглядный пример — это ртутный или спиртовой термометр. На этом уровне физическое воздействие температуры связано с изменением температуры, то есть, с разностью температур. Она определяет изменение объема или давления через коэффициент термического расширения, а также необходимое количество теплоты, связанное с теплоемкостью вещества. Также изменение температуры влияет на электрические и другие свойства вещества. В то же время в классической термодинамике вводится абсолютная температурная шкала, поскольку отношение функций температур практической шкалы связывается с максимальным коэффициентом полезного действия тепловой машины. При введении абсолютной температурной шкалы коэффициент полезного действия становится равным отношению температур, измеренных в этой шкале.

Хорошая новость связана с тем, что введенная таким образом абсолютная температурная шкала совпадает с температурой, измеренной газовым термометром в случае использования газа, подчиняющегося уравнению состояния идеального газа, приведенному в начале заметки. Таким образом построение идеальных тепловых машин для калибровки температуры не требуется. Плохая новость состоит в том, что поведение реальных газов несколько отличается от уравнения состояния идеального газа. В то же время молекулярно-кинетическая теория подсказывает вид уравнения состояния для реальных простых газов и метрологи в состоянии использовать газовый термометр с реальными газами путем введения поправок на неидеальность поведения этих газов.

Название абсолютная температурная шкала подчеркивает существование абсолютного нуля температур ($T = 0$ К в уравнении состояния идеального газа выше), поэтому для построения шкалы требуется только одна реперная точку, в качестве которой выбрана тройная точка воды. Ее численное значение было выбрано таким образом, чтобы получить совместимость с температурной шкалой Цельсия, но в конце концов получилось небольшое отличие для температуры кипения воды при нормальных условиях (самую малость меньше 100°C).

Я не буду вдаваться в детали кропотливой работы метрологов (поправка поправку подгоняет), только добавлю, что согласно законам термодинамики

вещество невозможно охладить до нуля кельвинов. В этом отношении реперная точка 0 К недостижима, что однако не помешало созданию работающей термодинамической шкалы температур. Надеюсь, что вышесказанное дает необходимое представление про образ идеального инструмента и про его отличие от использованных на практике реальных приборов, а также про сложности введения термодинамической шкалы температур при использовании реальных веществ.

Итак, теория физики говорит, что такое температура и объясняет процессы, протекающие при фазовых переходах веществ. Тем самым даются мысленные модели идеальных приборов и процедур, необходимых для калибровки температурной шкалы. На этой основе метрологи проводят многочисленные эксперименты с реальными приборами, которые приводят к созданию международной температурной шкалы. Это позволяет создать эффективные процедуры калибровки термометров различных классов точности, которые затем становятся доступными для использования на практике. Таким образом, в случае сложившейся теории физики, именно теория отвечает на вопрос, что такое температура и из этого следует, что можно считать измерением температуры. Все это в свою очередь позволяет не задумываясь сказать, что температура измеряется термометром.

История термометрии

В этом разделе рассмотрим историю термометрии; это откроет путь к обсуждению вопросов ван Фраассена в ходе исторического развития. Среди книг по истории термометрии отмечу книгу Хасока Чанга *‘Изобретение температуры: Измерение и научный прогресс’*, в которой дано интересное обсуждение ряда возникающих вопросов при становлении термометрии. Например, температура замерзания воды и кипения воды использовались как реперные точки при калибровке термометров; в то же время экспериментальное изучение процессов замерзания и кипения невозможно без использования термометра.

Интерес к количественному измерению температуры возник в 17-ом веке. Первые термометры были газовыми, но быстро обнаружилось, что их показания зависят как от температуры, так и от давления; поэтому в 18-ом веке перешли к использованию жидкостных термометров. Их использование потребовало уточнения вопросов о постоянстве температуры реперных точек, неравномерности шкалы между реперными точками (какое вещество обеспечивает правильную температурную шкалу), а также проблему измерения температуры ниже точки замерзания и выше точки кипения рабочего вещества. В 19-ом веке достигнутый прогресс позволил вернуться к газовым термометрам. Более точные измерения однако показали, что поведение разных газов несколько отличается друг от друга. Параллельно термометрия помогла разделить понятия температуры и теплоты, что в свою очередь способствовало возникновению термодинамики, в рамках которой задается построение

температурной шкалы, независимой от выбранного вещества термометра.

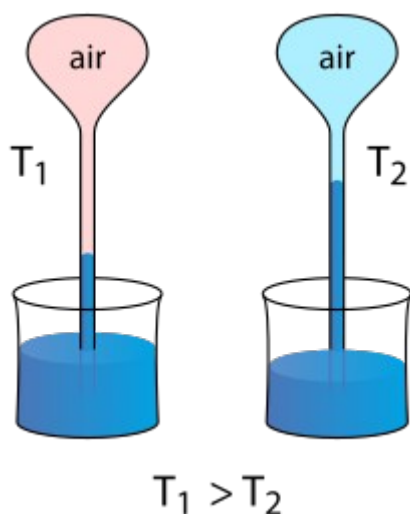
Введение

Кожа человека содержит терморецепторы, что позволяет ему распознать холод и тепло и этого было достаточно для большей части истории человечества. После появления технологий, связанных с высокими температурами (изготовление качественной стали или стекла), необходимый температурный режим выбирался посредством зрения. Это умение на протяжении веков передавалось от мастера к подмастерью.

Интересно отметить, что температура и темперамент имеют общее происхождение от латинского слова смешивать. В теории темперамента Галена в основы поведения людей были заложены категории горячий-холодный и сухой-влажный, а правильный темперамент достигался надлежащей смесью этих начал.

Филон Византийский (3 век до н. э.) сконструировал специальный прибор для доказательства, что объем воздуха зависит от температуры; от стеклянного шара с воздухом отходила трубка, заканчивающаяся в соседнем сосуде с водой. Изменение температуры воздуха в шаре приводило либо к выводу воздуха через трубку в случае повышения температуры, либо к втягивания воды при понижении температуры. Герон Александрийский (1 век н.э) использовал этот принцип в конструкциях многих устройств; расширение воздуха при нагревании использовалось для создания движения. Перевод книги Гермона 'Пневматика' в 16 веке на итальянский и латынь дали толчок к созданию первого термометра, который по конструкции был похож на устройство Филона.

Точно нельзя сказать, кому принадлежит приоритет создания первого термометра, поскольку идея витала в воздухе. Многие соглашаются с притязаниями Галилея, который в 1597 году описал эксперименты с прибором, аналогичным таковому у Филона — см. рисунок из [Вики](#) ниже:



Изменение температуры ведет к изменению высоты столбика воды. Правда, следует отметить, что эксперименты Галилея носили качественный характер без введения температурной шкалы. Отто фон Герике, Санторио, Дреббель и др. внесли вклад в усовершенствование газового термометра, но затем работа в этом направлении остановилась. Пришло осознание, что газовый термометр одновременно является барометром; другими словами его показания зависят в том числе от давления. Отмечу, что в то время эксперименты с давлением воздуха только начинались и барометр как таковой находился в процессе становления.

В результате в качестве рабочего тела стали использовать жидкость — спирт или ртуть. Один из первых термометров был изготовлен во Флорентийской академии (1641 г.), далее следует отметить работы Даленсе, Галлея, Гюйгенса, Гука, Ренальдини и др. Наибольшего успеха в технологии изготовления надежных термометров достигли Фаренгейт и Реомюр (1740 г.). Для калибровки термометров применялись разные реперные точки и также использовались разные шкалы.

Постоянство температуры реперных точек

В первой главе книги Чанга *‘Сохранение реперных точек фиксированными’* приведена интересная информация о изучении температуры кипения воды. Важно отметить, что температура кипения воды зависит от давления; это было обнаружено достаточно быстро. Решение в данном случае достаточно простое — выбрать в качестве реперной точки температуру кипения воды при определенном давлении и вводить необходимые поправки при процедуре калибровки. В то же время была еще одна серьезная проблема, про которую увлекательно рассказывается в книге Чанга. Даже при фиксированном давлении температура кипения воды несколько менялась в зависимости от того, как проводился процесс кипения воды — проблема связана с перегревом воды.

Я упомяну только два события. В 1772 году вышла книга Жана Андре Делюка *‘Исследование атмосферных изменений’*. В ней в том числе описывались исследования, связанные с перегревом воды. Делюк хотел установить истинную температуру кипения и он приложил специальные усилия по очистке воды от воздуха, но неожиданно это привело к сильному перегреву воды перед началом кипения. В 1776 году Королевское общество создало комитет под руководством Генри Кавендиша (Делюк также входил в комитет) по поводу реперных точек термометра. Были выработаны рекомендации по достижению воспроизводимой температуры кипения воды. Проблема оказалась связанной с центрами парообразования; дополнительные меры помогли избежать перегрева воды и тем самым позволили использовать температуру кипения воды как надежную реперную точку.

Оказалось, что при протекании процесса фазового перехода важно отличать кинетику процесса от изучения собственно равновесного состояния. При

калибровке термометров важны рекомендации по скорейшему достижению равновесного состояния. В то же время исследование перегрева воды, переохлаждения пара и воды принадлежат кинетике. Достижение понимания отличия одно от другого потребовало нетривиальных усилий в ходе исторического развития.

Неравномерность шкалы — выбор рабочего вещества

Параллельно обнаружилась проблема с жидкостными термометрами — расширение жидкости происходило неравномерно. Это можно было увидеть путем сравнения спиртового и ртутного термометра между собой. Каждый из них калибровался по температурам замерзания и кипения воды, после чего шкала делилась на равные интервалы. Сделанные таким образом ртутный и спиртовый термометр показывали разные температуры в промежутке от нуля до ста градусов Цельсия.

Причина отличия связана с непостоянством коэффициента термического расширения — он оказался функцией температуры. Встал вопрос, в каком веществе, спирте или ртути, коэффициент термического расширения более постоянный. Использование спиртового термометра в качестве стандарта дает коэффициент термического расширения ртути зависящим от температуры, и наоборот. Другими словами появился вопрос, существует ли правильная температурная шкала, которая не зависит от рабочего вещества термометра.

Промежуточный ответ был дан путем проведения экспериментов по смешению горячей и холодной воды. Одним из первых такие опыты проводил Георг Рихман в городе на Неве, результаты которых были опубликованы в 1750 году. Полученное правило Рихмана соответствует нашим представлениям в рамках точности измерений — смешение одинаковых количеств воды при нуле и ста градусов Цельсия дает конечную температуру пятьдесят градусов. Это соответствует предположению в современной терминологии о независимости теплоемкости от температуры. Отмечу, что в те времена еще не было четкого ответа о разнице между температурой и теплотой и этот вопрос будет рассмотрен в отдельном разделе.

Правда, Рихман просто использовал ртутный термометр, я не увидел более подробной информации почему Рихман остановился на ртутном, а не на спиртовом термометре. Эксперименты по сравнению результатов смешения воды при использовании ртутного и спиртового термометра провел Делюк. Мне осталось непонятным, знал ли Делюк об экспериментах Рихмана, но его ожидания были аналогичны — смешение одинаковых количеств воды при нуле и ста градусов Цельсия должно дать конечную температуру пятьдесят градусов. Делюк показал, что ртутный термометр в отличие от спиртового в этом случае дает ожидаемые результаты и поэтому ртуть является более правильным рабочим веществом для термометра, чем спирт.

Температура за пределами границ ртутного термометра

Чанг в главе *‘Выход за рамки’* интересно рассказывает о двух эпизодах в истории термометра. Вначале о путешествии в Сибирь в 1733 году Иоганна Георга Гмелина. В сибирские холода ртуть в термометре замерзла; Гмелин же был уверен, что ртуть не замерзает, поэтому у него сибирские холода получили слишком низкое значение температуры. Это в свою очередь вызвало ряд исследований по поиску температуры замерзания ртути и вопрос, как можно измерять температуру ниже температуры замерзания ртути.

Второй эпизод связан с высокими температурами в печах, которые нужно было контролировать. В данном случае важно отметить, что высшая температура ртутного термометра ограничена температурой кипения ртути (357°C). Изготовитель керамики Джозая Уэджвуд (Josiah Wedgwood) предложил прибор для измерения температуры в печи, основанный на сжатии глины при нагревании (процесс спекания). Однако шкала температур, предложенная Уэджвудом, давала слишком высокие температуры и поэтому была отвергнута.

Это также поднимало вопрос о правильно температурной шкале. Выбранное рабочее вещество, ртуть, имело ограничение, связанное с температурой замерзания и кипения. Можно было попытаться выбрать другую жидкость, но непонятно, каким образом соединить температурные шкалы между собой. По всей видимости, интуитивно хотелось бы получить гладкие функции для температурного коэффициента расширения и результаты, аналогичные при смешении горячей и холодной воды, но было непонятно как достичь эту цель. Таким образом в конце 18-ого — начале 19-ого века возобновился интерес к газовому термометру и появилась надежда, что уравнение состояния газа позволит ввести универсальную температурную шкалу.

Уравнение состояния идеального газа и газовые термометры

Газовой термометр непосредственно связан с уравнением состояния газа. В случае постоянства давление зависимость объема от температуры выражается законом Гей-Люссака:

$$V = V_0(1 + \alpha t)$$

где V_0 означает объем газа при нуле Цельсия ($t = 0^\circ\text{C}$), α — это коэффициент объемного расширения. Аналогичная зависимость существует для изменения давления при постоянном объеме:

$$p = p_0(1 + \alpha t)$$

где p_0 — это давление при нуле Цельсия, α — это относительный коэффициент давления; важно отметить, что численное значение α совпадает с таковым в уравнении (2), именно поэтому использован один и тот же символ. Надежда состояла в том, что коэффициент α не зависит от температуры и давления и одинаков для всех газов.

Следует отметить работы Гийома Амонтонна 1702 года, который провел похожие эксперименты на сто лет раньше Гей-Люссака и получил сравнимое значение

величины α . Однако за последующие сто лет многочисленные эксперименты с термическим расширением газов показали значительный разброс в значении α , разница достигала несколько раз. Гей-Люссак обнаружил, что этот разброс связан с остатками воды в приборах и если предпринять специальные меры по высушиванию сосудов, то значения α будут достаточно близки друг к другу для различных газов. Также следует отметить вклад в изучение теплового расширения газов Алессандро Вольта, Жака Шарля и Джона Дальтона.

Объединение уравнений выше вместе с законом Бойля-Мариотта плюс введения числа молей и универсальной газовой постоянной приводит к уравнению состояния идеального газа, приведенного в начале заметки. Переход от градусов Цельсия к кельвинам осуществляется следующим образом: $T = (1/\alpha + t)$. Важно отметить, что в начале девятнадцатого века газовые законы считались универсальными для всех газов. Именно это позволяло надеяться, что температурная шкала, определенная по закону Гей-Люссака не зависит от используемого газа и поэтому является универсальной.

Однако более точные измерения физика Анри Виктора Реньо показали, что поведение разных газов несколько отличается друг от друга и от предполагаемого универсального уравнения состояния газа. В то же время было показано, что поведение газа при понижении давления стремится к универсальному состоянию, поэтому во второй половине 19-ого века было появился термин ‘уравнение состояния идеального газа’. Появление молекулярно-кинетической теории дало объяснение наблюдаемым эффектам — уравнение состояния идеального газа отвечало газу без взаимодействий между молекулами, что достигалось при малых концентрациях (малых давлениях).

В любом случае именно газовый термометр стал рассматриваться как наиболее точное устройство для измерения температуры. В 1889 г. была принята первая международная практическая температурная шкала на основе водородного газового термометра постоянного объема с двумя реперными точками. Большую роль в принятии этого стандарта сыграли экспериментальные работы физика Пьера Шапюи.

Температура, теплота и термодинамическая шкала

Рассмотрим более подробно развитие понятий температура и теплота. В книге Чанга отмечается, что Цельсий приписал нуль градусов температуре кипения воды и сто градусов температуре плавления льда, а привычные нам перевернутые значения появились после Цельсия. Чанг предполагает, что такое решение Цельсия было связано с представлениями о градусах холода, а не о градусах тепла.

Другими словами, первоначальные представления были связаны с существованием двух разных качеств, холода и тепла, а температура предположительно показывала степень смешения этих качеств. По ходу времени стало понятно, что можно говорить либо о градусах теплоты, либо о

градусах тепла, но термометрия не позволяет различить эти представления. Следующий шаг заключался в отождествлении холода с отсутствием теплоты (18-ый век).

Таким образом, температура стала представляться мерой теплоты. Эксперименты, аналогичные смешению теплой и холодной воды, стали основными в прояснении связи между температурой и теплотой. Это произошло при проведении опытов и обсуждений результатов во второй половине 18-ого века. Обычно в этой связи приводят имена Джозефа Блэка и Иоганна Вильке, но были и другие участники проведения и обсуждения подобных экспериментов.

Было показано, что правило Рихмана не работает при смешении горячей воды и холодной ртути, а также при смешении теплой воды и льда. Начнем с последнего, поскольку этот эффект наглядно показывает, что выделение / поглощение теплоты может происходить при постоянной температуре. Блэк в этом отношении ввел понятие скрытой теплоты, под этим понималась теплота фазового перехода. Далее было установлено, что скрытая теплота связана со всеми известными в то время фазовыми переходами.

Следующий шаг был связан с введением понятия теплоемкости тела — это дало объяснению экспериментов по смешению горячей воды и холодной ртути. Далее опыты по смешению тел с разной температурой привели к появлению калориметрии смешения. Теплоемкость воды была принята за единицу и это давало возможность для определения теплоемкостей других тел и численно определить скрытые теплоты. Затем Антуан Лавуазье и Пьер-Симон Лаплас предложили новую конструкцию калориметра в 1780 году, который получил название ледяной калориметр.

Калориметр состоял из внутреннего сосуда, который содержал изучаемое тело; например, вещество при какой-то температуре. Внутренний сосуд помещался в камеру, в которой находился толченный лед. В ходе достижения теплового равновесия лед плавился и стекал вниз — по массе расплавившегося льда можно было определить количество теплоты, потребовавшееся для достижения теплового равновесия при температуре льда изучаемым телом. Ледяной калориметр разных конструкций активно использовался для измерения теплоты в разных процессах в 19-ом веке. Так, Герман Гесс на берегах Невы измерял ледяным калориметром теплоты химических реакций и установил закон Гесса, что теплота реакции не зависит от пути проведения реакции.

История становления термодинамики описана в отдельной заметке: [‘От теории теплорода к термодинамике’](#). Для рассмотрения температуры важно, что в ходе развития термодинамики появилось понятие термодинамической шкалы температур, что исключило зависимость температурной шкалы от рабочего вещества термометра.

Обсуждение

Историческое рассмотрение позволяет лучше понять, каким образом сложилась теория физики, инструменты для измерения температуры и стандартизация температурной шкалы. В то же время оно дает другой взгляд на отношения между экспериментом и теорией. Экспериментальное изучение закономерностей, связанных с температурой и теплотой, по ходу истории вполне понятно с современной точки зрения. Ученые в те времена исходили совсем из других соображений, но это не мешает в настоящее время обсуждению этих результатов. Таким образом это показывает относительную независимость эксперимента от теории, хотя использование количественных данных тех времен возможно будет затруднено в силу неясностей использованных стандартов измерения.

С другой стороны полезно рассмотреть становление теории физики в ходе исторического процесса. Например, Смородинский замечает:

‘История о том, как научились измерять температуру, интересна и необычна. Термометры были придуманы за много лет до того, как люди поняли, что именно они измеряют.’

Это правильное утверждение, но несмотря на это можно также понять ход рассуждений о проводимых экспериментах глазами ученых тех времен. В книге Чанга есть неплохое обсуждение этих вопросов — что думали ученые о температуре и теплоте в те времена. Можно увидеть итеративное развитие, выдвигались гипотезы, ставились опыты, результаты обсуждались и появлялись новые гипотезы. Это подчеркивает, что социальный конструктивизм при обсуждении связи теории и эксперимента переоценивает влияние общества; говоря словами Бруно Латура, вещи дают сдачи. С другой стороны, не стоит упускать из виду итеративный характер развития науки. Можно только сказать, что в конце концов развитие физики достигло стабильного состояния, когда новые эксперименты находятся в согласии с существующей теорией физики.

Возникает вопрос, является ли достигнутое состояние физики единственно возможным. Должен признаться, что я долгое время работал в области химической термодинамики, в основе которой лежит классическая термодинамика. Поэтому мне трудно представить другую возможность развития; аргументация в книге Чанга, что такое в принципе можно себе представить, меня не убедила.

С моей точки зрения самое важное в ходе исторического развития термометрии — это понимание разницы между температурой и теплотой. Формирование понятий температура и теплота было связано со становлением двух разных инструментов: термометра как инструмента измерения температуры и калориметра как инструмента измерения теплоты (более правильно измерения энтальпии). Эта разница далее была зафиксирована в теории физики. Мне сложно представить альтернативный путь развития, в котором разделение температуры и теплоты произошло бы другим образом.

Что касается измерения температуры, то важно отметить роль погрешностей измерения. Разработка инструментов измерения температуры начиналась с относительно больших погрешностей измерения и тем самым можно было удовлетвориться относительно простой моделью расширения рабочего тела. Так, тепловое расширение твердых тел мало и можно было пренебречь изменением объема корпуса термометра при повышении температуры. Влияние давления на объем жидкости также невелико — им вполне можно пренебречь в небольшом интервале изменения атмосферного давления. Таким образом, использование жидкостных термометров приводило к стабильным и воспроизводимым результатам.

Зависимостью газов от давления пренебречь уже было нельзя, но параллельно появились барометры, которые позволили изучить уравнение состояния газов. В рамках относительно больших первоначальных погрешностей измерения возникло убеждение в существовании универсального уравнения состояния для всех газов, которое впоследствии оказалось важным в том числе для развития термодинамики. Повышение точности измерений показали отклонения в поведении реальных газов от предполагаемого универсального уравнения состояния, что в свою очередь стимулировало новые экспериментальные работы и развитие молекулярно-кинетической теории.

В отличие от классической термодинамики статус молекулярно-кинетической теории остается не совсем определенный. Развитие физики в начале 20-ого века показало, что представление о газе как множестве сталкивающихся и взаимодействующих между собой бильярдных шаров неправильно; поэтому следует сказать, что атомизм 19-ого века ушел в прошлое. Некоторые модельные представления на этом уровне остаются полезными, но правильная мысленная модель на этом уровне требует включения квантования. Это в свою очередь приводит к проблемам при создании нового мысленного образа, что в настоящее время хорошо заметно в спорах между физиками о так называемой интерпретации квантовой механики.

По-моему, основная проблема связана с трактовкой введения вероятности в мысленной образ. Становится непонятно, что такое объективная вероятность: связана ли она с миром или с незнанием человека. Я остановлюсь на констатации того, что проблемы с вероятностью начались уже в молекулярно-кинетической теории. Все настолько привыкли к использованию распределения Максвелла-Больцмана, что вопрос о соответствующем правильном мысленном образе обычно не поднимается. В то же время следует отметить, что согласия между физиками не наблюдается уже на этом этапе. Некоторые физики считают соответствующие вероятности объективными (энтропия объективна), а некоторые субъективными (энтропия субъективна).

См. также

[Мысли о математике](#): Подход Успенского и чистая математика. История

математики: возникновение чистой математики. Математические структуры в чистой математике. Математическое доказательство и интуиция. Математика и мир.

Информация

Bas C. van Fraassen, *Scientific Representation: Paradoxes of Perspectives*, Part II: *Windows, Engines, and Measurement*, 2008.

[Бас ван Фраассен: Окна, машины и измерения](#)

Я. А. Смородинский. *Температура*, 2-е изд., 1987.

Т. Куинн, *Температура*, 1985.

[Температура, термометр и практическая температурная шкала](#)

П. С. Кудрявцев, *История физики*, т. 1, *От древности до Менделеева*, 1956.

И. Р. Кричевский, *Понятие и основы термодинамики*, 1970, Глава III, *Теплота*.

Ю. И. Соловьев, *Очерки по истории физической химии*, 1964, Глава III, *Термохимия*.

[Теплота и калориметрия](#)

Hasok Chang, *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*, 2004

[Хасок Чанг: Изобретение температуры](#)

Ф. Розенбергер, *История физики*, часть вторая, *История физики в Новое время*, 1933.

Ф. Розенбергер, *История физики*, часть третья, *История физики за последнее (XIX) столетие*, выпуск I, 1935.

Киселева, М. Н. *К истории открытия уравнения состояния идеального газа*. В кн. *Менделеевский сборник*, с. 85 — 97, 1999.

[Уравнение состояние идеального газа](#)

Дополнительная информация

[От теории теплорода к термодинамике](#)

Теория теплорода и принцип невозможности вечного двигателя. Цикл Карно в рамках теории теплорода. Эквивалентность работы и теплоты. Первый и второй законы термодинамики.

[Гельмгольц, Мах и Дюгем о измерении в физике](#)

Сравнение позиций Гельмгольца, Дюгема и Маха показывает суть принципа координации (термин введен в рассмотрение Махом). Рассмотрение измерение температуры играло у Маха и Дюгема большую роль.

Физическая величина и эмпирический факт

Связь измерения физической величины с теорией физики на примере измерения длины. Наличие погрешности измерения позволяет говорить об эмпирической науке, отделенной от обсуждения картины мира.

Обсуждение

<https://evgeniirudnyi.livejournal.com/382106.html>