

Проблема координации: Температура как физическая величина

Е. Б. Рудный, 2025, evgenii@rudnyi.ru

Аннотация. Физическая величина связана с измерением, но понятие физической величины не сводится к измерению. Этот вопрос рассмотрен на примере температуры в рамках проблемы координации, введенной Басом ван Фраассеном. Проблема координации включает в себя два уровня рассмотрения. На первом этапе будет рассмотрен современный этап развития, когда физическая величина связана с теорией физики. Второй этап связан с историей становления соответствующей теории физики. Также рассмотрены взгляды на измерение физической величины физиков 19-ого века: Гельмгольца, Маха и Дюгема. Это показывает преемственность взглядов ван Фраассена с обсуждением этого вопроса в конце 19-ого века.

Ключевые слова: Температура, физическая величина, измерение, история физики, философия физики

Содержание

Введение.....	1
Математика, физика и измерение.....	2
Измерение температуры в настоящее время.....	3
Эпизоды из истории термометрии.....	5
Постоянство температуры реперных точек.....	5
Неравномерность шкалы — выбор рабочего вещества.....	6
Температура за пределами границ ртутного термометра.....	6
Уравнение состояния идеального газа и газовые термометры.....	6
Гельмгольц, Мах и Дюгем о измерении в физике.....	8
Обсуждение.....	12
Список литературы.....	14

Введение

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 будет 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 представляется тривиальным — 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 нет ничего странного в том, что физики открыли зависимость одной физической величины от другой и выразили ее математическим уравнением.

Для того, чтобы показать наличие проблемы Бас ван Фраассен предложил два связанных вопроса о физической величине [1]; ниже на примере температуры:

- Что можно считать измерением температуры;
- Что такое температура.

В книге ван Фраассена вводится термин 'проблема координации' и в том числе кратко обсуждено рассмотрение этих вопросов на примере температуры; это послужило основой для настоящей работы. Термометр измеряет температуру, но для понимания смысла этого утверждения требуется сказать, что такое температура без введения в рассмотрение инструмента измерения температуры. Это 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.

В первом разделе *'Математика, физика и измерение'* будут затронуты общие вопросы проведения измерения на уровне предварительного рассмотрения. Затем эти вопросы будут более подробно рассмотрены в разделе *'Измерение температуры в настоящее время'*. Это будет взгляд на проблему координации и термодинамическую шкалу температур с точки зрения сложившейся теории физики. После этого в следующем разделе будет рассмотрен эпизоды из истории термометрии, что даст нам взгляд на проблему координации в ходе становления соответствующей теории; будут использованы эпизоды становления термометрии из книги Чанга [2]. В ходе становления термометрии появлялись нетривиальные вопросы, но их удалось решить в ходе итеративного становления необходимой теории. В разделе *'Гельмгольц, Мах и Дюгем о измерении в физике'* будут представлены взгляды физиков 19-ого века. Это покажет преемственность проблемы координации, поставленной ван Фраассеном со взглядами физиков 19-ого века. Статья завершится общим обсуждением рассмотренных вопросов.

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 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 концептуальная 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 об измерении также 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 потребуются скорректировать приведенное значение температуры для перехода к текущей версии международной шкалы температур.

Измерение температуры в настоящее время

При рассмотрении температуры есть две теории, связанные с двумя разными уровнями организации. Начну с молекулярно-кинетической теории, где температура обычно связывается со средней кинетической энергией молекул. 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.

Использование термометра предполагает достижение теплового равновесия между термометром и изучаемой системой. Поэтому необходимый концептуальный 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 концептуальным образом на уровне молекулярно-кинетической теории. Правда, такая концептуальная модель мало помогает создать образ идеального инструмента для измерения температуры.

В результате рассмотрение температуры более правильно вести на уровне механики сплошных сред. 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.

Отмечу, что впервые такое определение дано Джеймсом Максвеллом в книге '*Теория теплоты*' в 1871 году [3]. Измерение температуры отличается от измерения длины тем, что операция сложения температур теряет смысл; длина считается экстенсивным свойством, температура - интенсивным. В случае температуры следует говорить об установлении теплового равновесия между телами и о транзитивности температуры.

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 [4]; а также газовый и жидкостный термометры сыграли основную роль в становлении термометрии. Концептуальная модель обоих термометров связана с постулатом о существовании термического уравнения состояния; в случае постоянства массы и состава математическая запись выглядит таким образом $f(p, V, T) = 0$.

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 точка, в качестве которой выбрана тройная точка воды. Я не буду вдаваться в детали кропотливой работы метрологов (поправка поправку подгоняет), только добавлю, что согласно законам термодинамики вещество невозможно охладить до абсолютного нуля. 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 (реперные точки). Тем самым задаются концептуальные 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.

Эпизоды из истории термометрии

В книге ван Фраассена также кратко рассмотрена история термометрии - ван Фраассен отмечает, что несмотря на отсутствие теории понимание становления термометрии также не вызывает трудностей. Я буду использовать примеры из книги Хасока Чанга *‘Изобретение температуры: Измерение и научный прогресс’* [2], в которой дано интересное обсуждение ряда возникавших вопросов при становлении термометрии.

Интерес к количественному измерению температуры возник в 17-ом веке [5, 6]. 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 рабочего вещества термометра.

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 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.

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 было видно 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 спиртовой 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. Эксперименты по сравнению результатов смешения воды при использовании ртутного и спиртового термометра провел Делюк. 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. При постоянном давлении 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 для объема, именно поэтому использован один и тот же символ. Надежда состояла в том, что коэффициент α не зависит от температуры и давления, а также одинаков для всех газов.

Следует отметить работы Гийома Амонтона 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 [5].

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:

$$T = (1/\alpha + t)$$

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 Шэппюи.

Введение абсолютной шкалы температур связано с развитием термодинамики, но я не буду на этом останавливаться, см. [7]. Для рассмотрения температуры важно, что в ходе развития термодинамики появилось понятие термодинамической шкалы температур, что исключило зависимость температурной шкалы от рабочего вещества термометра. В то же время было доказано, что такая абсолютная температурная шкала совпадает с температурной шкалой газового термометра в случае использования уравнения состояния идеального газа для рабочего тела.

Гельмгольц, Мах и Дюгем о измерении в физике

Пионером теории измерений считается Герман Гельмгольц - в 1887 году он посвятил этому вопросу эссе *'Счёт и измерение'* [8]. Эрнст Мах далее ввел понятие 'принцип координации', при использовании которого можно более четко описать процесс приписывания численного значения результату измерений. Пьер Дюгем в свою очередь показал связь измерения с теорией физики, он ввел в рассмотрение понятие 'идеальный прибор'. Комбинация взглядов Маха и Дюгема приводит к разумной позиции, которую близка к позиции ван Фраассена.

В статье историка Дарриголя *'Число и мера: Герман фон Гельмгольц на стыке математики, физики и психологии'* [9] неплохо представлена атмосфера того времени, что помогает лучше понять устремления Гельмгольца:

- Появление неевклидовых геометрий потребовало переосмысление связи аксиом и мира. Согласно Гельмгольцу геометрия являлась экспериментальной наукой; аксиомы геометрии связаны с опытом.
- Не существовало общепринятой аксиоматизации арифметики. В то же время уже появились математические монстры - непрерывные функции, не имеющие производных во всех точках.
- Обсуждение возможности измерений в психологии.
- Экстенсивные и интенсивные величины. Температура как пример физической интенсивной величины.

Гельмгольц объединил аксиоматику арифметики с проведением измерений экстенсивных величин (Гельмгольц называет их аддитивными):

'Защищаемая мною эмпирическая теория не признающая аксиомы геометрии за недопускающие доказательства и не нуждающиеся в доказательстве положения должна быть конечно подтверждена и на происхождении арифметических аксиом, стоящих к форме воззрения времени в отношении аналогичном отношению между аксиомами геометрии и формою воззрения пространства.'

Гельмгольц также отмечает существование интенсивных физических величин, но их измерение у него зависит от измерения аддитивных величин. Таким образом у Гельмгольца основанием аксиоматизации арифметики служила возможность проведения измерения экстенсивных величин. Интересно посмотреть как он обошелся с иррациональными числами:

'Иррациональные отношения могут встречаться в вещественных объектах, в числах они не могут никогда быть точно представлены; зато их численное значение может быть включено в произвольно тесные границы. Это сужение пределов достаточно для всех вычислений таких функций, значения которых при уменьшающихся изменениях величин, от которых они зависят, также получают все меньшие и меньшие изменения, которые могут сделаться менее сколь угодно малой величины. Именно это и имеет место при вычислении всех допускающих дифференцирование функций иррациональных величин. Напротив могут быть составлены прерывные функции, для вычисления которых не достаточно знания тех произвольно суженных пределов, между которыми лежит иррациональное значение. Для них недостаточно представления иррациональных величин системою наших чисел. Впрочем в геометрии и физике мы не встречаемся с такими видами прерывности.'

Должно быть понятно, что большинство математиков были не в восторге от аксиоматизации арифметики Гельмгольца. Так, Кантор сравнил подход Гельмгольца со взглядом математика эпохи Просвещения Луи Бертрана (Louis Bertrand); мол, числа по

Гельмгольцу являются именами, которые пастухи использовали для подсчета овец. В то же время такой подход к математике нашел понимание со стороны физиков, в том числе Маха и Дюгема.

Перейду к описанию принципа координации (Zuordnungsprinzip) в книге Маха *'Принципы теории теплоты'* [10]. Вначале отмечу, что в книге есть глава *'Имена и числа'*, в которой одобрительно упоминается работа Гельмгольца и высказывается даже более радикальная позиция: *'Числа также являются именами'*. В следующей главе *'Континуум'* разбираются вопросы числовой оси с точки зрения психологии. Мах делает вывод, что введение континуума не следует воспринимать в буквальном смысле слова, скорее это следует отнести к фикциям.

В главе *'Критика понятия температуры'* Мах разбирает измерение температуры, при этом он разделяет понятия тепловое состояние (Wärmezustand) и температура (Temperatur). Последнее относится к показаниям термометра, то есть, температура согласно Маху есть численное значение теплового состояния. В то же время тепловое состояние является характеристикой тела - в тепловом равновесии два тела имеют одинаковые тепловые состояния. В дословном переводе это звучит неуклюже, поскольку в русском в обоих случаях принято использовать термин температура. Тем не менее, я пока оставлю терминологию Маха, поскольку это позволит лучше охарактеризовать его взгляды.

Под принципом координации Мах понимает соответствие между численными значениями и разбивкой шкалы термометра. Он отталкивается от истории термометрии, рассмотренной в его книге в предыдущей главе, и показывает, что становление температурной шкалы связано с соглашениями; см. раздел *'Эпизоды из истории термометрии'* выше.

Как бы то ни было, в отношении температурной шкалы отношение Маха можно характеризовать как конвенционализм. В целом с этим можно согласиться - выбор единицы измерения есть результат соглашения. В то же время понятие тепловое состояние тела и его транзитивность (Мах ссылается на Максвелла) связано с опытом, то есть, конвенционализм не распространяется на понятие теплового состояния. Также Мах отмечает, что измеряемая температура является функцией состояния тела. Это также результат опыта и не следует только из соглашения по поводу выбора температурной шкалы.

Таким образом, позиция Маха не сводится к операционализму, когда тепловым состоянием объявляется то, что измеряет термометр. В данном случае можно утверждать, что в результате развития термометрии удалось создать температурную шкалу, которую можно использовать для характеристики теплового состояния тела. Но само понятие тепловое состояние по Маху не зависит от принятой температурной шкалы. В моем понимании принцип координации в книге Маха звучит таким образом: численное значение температуры связано с исторически обусловленными происхождением шкалы термометра; в то же время термометр имеет тепловое состояние, которое характеризует тепловое состояние других тел при измерении температуры.

Теперь рассмотрим позицию Дюгема во второй части *'Строение физической теории'* книги *'Физическая теория, её цель и строение'* [11]. В главе *'Количество и качество'* Дюгем начинает с утверждения, что теоретическая физика должна быть физикой математической. Для осуществления этого проекта необходимо уметь выражать физическое свойство *'численным символом'*. Далее Дюгем рассматривает измерение длины в духе Гельмгольца и распространяет сказанное на другие экстенсивные величины; в книге Дюгема это является примером измерения количеств.

Следующий шаг - рассмотрение качеств в духе Аристотеля. Дюгем считает изгнание

качеств недостатком картезианской физики и полагает, что вполне можно ввести математическую шкалу интенсивности качества. В отличие от количества в данном случае все будет опираться на операции равенства, больше и меньше; другими словами шкала служит упорядочению отношений, но при этом операция сложения не играет особой роли. Дюгем считает, что такого подхода будет достаточно для введения качеств в теоретическую физику.

Проблематика, связанная с принципом координации (Дюгем не использует этого термина), рассмотрена в главе '*Физический опыт*'. Дюгем показывает связь проводимого опыта с теорией физики и отличие фактов в проводимом измерении от фактов на уровне наблюдения. Приведу описание Дюгемом опыта физика Анри Реньо (транскрипция в книге Реньо). Кстати, оно наглядно показывает недостижимость идеала логических позитивистов - сведения научных наблюдений к элементарным суждениям о мире:

'Реньо изучает сжимаемость газов. Он берет известное количество газа, замкнутое в стеклянной трубке, и, поддерживая постоянную температуру, измеряет давление, которому подвергается газ, и объем, который он занимает. Вот, скажут, строго точное наблюдение известных явлений, известных фактов. Конечно, под руками и на глазах Реньо, под руками и на глазах его помощников произошли конкретные факты - в этом нет сомнения. Но заключается ли то, что внес Реньо в дело развития физики, в описании этих фактов? Нет. Реньо видел в визирном приборе, как изображение известной поверхности ртути соприкасается с известной чертой. Но разве это он записал в отчете о своих исследованиях? Нет, он записал, что газ занимает такой-то объем. Один из его помощников приподнимал и опускал трубку катетометра до тех пор, покуда изображение другого уровня ртути не коснулось определенной нити волостного перекрестка. Затем он наблюдал положение известных линий на масштабе и на нониусе катетометра. Но разве это мы находим в записках Реньо? Нет мы здесь читаем, каково давление, произведенное на газ. Другой помощник наблюдал на термометре, как уровень жидкости в нем передвигался от одной линии к другой. Но разве это он написал? Нет, мы здесь находим, что температура газа изменилось от такого-то до такого-то градуса.'

Дюгем не использует термин метрология, но его описание выше наглядно показывает, что измерения в физике невозможны без введения соответствующих метрологических стандартов и процедур. В изложении Дюгема это выглядит таким образом:

'Физический эксперимент есть точное наблюдение группы явлений, связанное с истолкованием этих явлений. Это истолкование заменяет конкретные данные, действительно полученные наблюдением, абстрактными и символическими описаниями, соответствующими этим данным на основании допущенных наблюдателем теории.'

В дальнейшем рассмотрении Дюгем более полно раскрывает сказанное. Я ограничусь рассмотрением важного понятия идеального инструмента:

'Когда физик производит какой-нибудь опыт, ум его одновременно занимают два прекрасно различаемых представления об инструменте, с которым он работает: одно есть образ конкретного инструмента, с которым он действительно работает, другое - схематический тип того же инструмента, построенный с помощью символов, данных теориями. И именно к этому второму инструменту, идеальному и символическому, он применяет законы и формулы физики.'

Именно это обстоятельство приводит к введению поправок в проводимых измерениях:

'Будь физический эксперимент простым констатированием факта, было бы абсурдом

производить в нем поправки. ... Напротив того, логическая роль поправок становится вполне понятной, если вспомнить, что физический эксперимент есть не только констатирование группы фактов, но и перевод этих фактов на символический язык при помощи правил, заимствованных из физической теории. Отсюда в действительности следует, что физик постоянно сравнивает между собой два инструмента: реальный инструмент, с которым он работает, и инструмент идеальный и символический, о котором он рассуждает.'

Важно отметить, что Дюгем рассматривает погрешности измерения - сюда он включает ошибку считывания показаний на шкале, систематические ошибки, связанные с неучтенными обстоятельствами, и случайные ошибки. Последний раздел этой главы имеет выразительное название *'Физический эксперимент менее достоверен, но более точен и детален, чем ненаучное констатирование факта'*. В нем Дюгем сравнивает результаты физического эксперимента с фактом обыденной жизни: 'я на такой-то улице видел лошадь белой масти'. Отмечается, что зависимость эксперимента от теории делает его результаты несколько более хрупкими, но в то же время позволяет более четко выразить происходящее.

Введение Дюгемом теории физики в рассмотрение делает более четким рассмотрение Маха. Транзитивность теплового состояния плюс существование термического уравнения состояния является выражением простой, но вполне определенной теории физики. Такое утверждение в сочетании с понятиями объема и давления из геометрии и механики вполне достаточно для построения идеального инструмента при обсуждении опытов Реньо. В то же время это составляет основу при становлении практической температурной шкалы и является пререквизитом классической термодинамики.

У Маха и Дюгема отличаются рассмотрение теории физики. Мах рассматривает процесс введения практической температурной шкалы в рамках исторического процесса. Дюгем же рассматривает измерения Реньо с точки зрения уже существующей теории физики. Объединение этих позиций приводит к более взвешенной позиции. Историческое развитие приводит к становлению теории физики; при этом практическая возможность введения воспроизводимой метрологии на основе этой теории свидетельствует о ее устойчивости. В таком виде проблема координации представлена в книге ван Фраассена.

Несколько слов о погрешностях измерения - в рассмотрении ван Фраассена этом вопросу не уделено достаточное внимание. В настоящее время не стоит стараться провести аксиоматизацию математики в духе Гельмгольца; построение математики является делом математиков. В то же время наличие погрешностей измерения позволяет исключить из экспериментальной науки вопросы существования в математическом смысле (например, доказательство о существовании трансцендентных чисел).

С точки зрения экспериментальной науки математика становится полезным инструментом для описания мира в рамках теоретической физики. Высказывание Гельмгольца о иррациональных числах выше лучше всего рассматривать в рамках наличия погрешностей измерения. Математики вправе поместить на числовой оси какие угодно сущности (например, бесконечно малые в нестандартном анализе), но результаты экспериментального измерения ограничены рациональными числами. Более того, как правильно отмечает Дюгем, экспериментальному факту с неизбежным наличием погрешности измерения соответствует бесконечное количество теоретических предсказаний:

'практическому факту соответствует не один только теоретический факт, а как бы целый пучок таких фактов, между собой различных. ... Предел этот есть предел ошибки, которой сопровождается измерение этого элемента. Чем совершеннее методы измерения, чем большее приближение они допускают, тем теснее этот предел. Но он никогда не может исчезнуть совсем.'

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 [12] 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.

Список литературы

1. Bas C. van Fraassen, *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*, Part II: *Windows, Engines, and Measurement*, 2008.
2. Hasok Chang, *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*, 2004.
3. Maxwell J. C. *Theory of Heat*, London: Longmans, Green, and Co. 1871. 340 p.
4. Т. Куинн, *Температура*, 1985.
5. Ф. Розенбергер, *История физики*, часть вторая, *История физики в Новое время*, 1933. Часть третья, *История физики за последнее (XIX) столетие*, выпуск I, 1935.
6. П. С. Кудрявцев, *История физики*, т. 1, *От древности до Менделеева*, 1956.
7. Е. Б. Рудный, *Осмысление энтропии в свете свечи*, 2025, читать [онлайн](#).
8. Н. Helmholtz, *Zählen und Messen, erkenntnisstheoretisch betrachtet*. 1887. Перевод на русский в 1892 году. В 1893 году вышла книга: Г. Гельмгольц, *Счёт и измерение*. Книга также содержит вторую работу: Л. Кронекер, *Понятие о числе*.
9. Olivier Darrigol. *Number and measure: Hermann von Helmholtz at the crossroads of mathematics, physics, and psychology*. *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 34, no. 3 (2003): 515-573.
10. Ernst Mach, *Die Principien der Wärmelehre*, 1900 (первое издание было в 1896 году).
11. Пьер Дюгем, *Физическая теория, её цель и строение*. СПб., 1910. (Репринт: М.: КомКнига, 2007). Первое издание на французском в 1906 году.
12. Я. А. Смородинский. *Температура*, 2-е изд., 1987.