

# ТЕМПЕРАТУРА: МЕТАМОРФОЗЫ РУЧНЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ, или ПРАВДА – ХОРОШО, А СЧАСТЬЕ ЛУЧШЕ

Доктор технических наук В.Ф. ОЧКОВ, А. ДАВААХУУ  
(НИУ “МЭИ”)

DOI: 10.7868/S0233361923040018

**К**ак известно, в международной системе измерений (СИ) “ровно” семь базовых единиц – килограмм (масса), метр (расстояние), секунда (время), ампер (сила электрического тока), моль (количество вещества), кандела (сила света) и кельвин (температура). Умные люди – физики – утверждают, что для метрического описания нашего мира вполне достаточно только трех единиц (грамм–метр–секунда). Остальные четыре “базовые” единицы (ампер–моль–кандела–кельвин) происходят “от лукавого”, вернее, из принципа, гласящего, что “правда – хорошо, а счастье лучше” (есть даже пьеса Островского с таким названием).

Ампер с некоторыми оговорками, связанными с разной записью закона Кулона, можно выразить через метр в степени полтора, умноженный на квадратный корень из килограмма и деленный на секунду в квадрате. Чтобы “не париться” с такой “трехэтажной” единицей, и ввели в метрологический обиход единицу ампер. Помните

задорную песню, которая когда-то считалась неофициальным гимном МЭИ: *“Нам электричество глухую тьму разбудит, нам электричество пахать и сеять будет, нам электричество заменит всякий труд: нажал на кнопку – чик-чирик! – всё тут как тут”*. Эта песня у нас распевалась в те времена, когда в Европе создавалась СИ и “отцы-основатели” этой системы измерения тоже находились в эйфории от того, что все мировые проблемы будут решены с помощью электричества. Как тут обойтись без ампера – единицы силы тока!? А почему в “великолепную семерку СИ” не вставили вольт или ом вместо ампера? А потому, что Алессандро Вольт (1745–1827) был итальянцем, а Георг Ом (1789–1854) – немцем, Андре-Мари Ампер (1775–1836) был французом! Именно Франция с её Великой Французской революцией стояла у истоков килограмма и метра. Но тут обиделись англичане и настояли на том, чтобы Уильяма Томсона (1824–1907) наградить не только титулом лорда, но и именной единицей

измерения. Вот и придумали кельвины. А теперь это неловко отменить, признаваться, что покривили против истины. Это хорошо понимают физики, используя единицы энергии электрон-вольты для своих расчётов, связанных с температурой.

Моли же – это не что иное, как безразмерные штуки. Если ввести в расчёты силу света как базовую единицу СИ, то нужно придумать и базовую единицу силы звука, силы запаха... А почему же кельвин стал базовой единицей СИ? Можно ли и эту единицу температуры свести к гауссовской триаде "масса–расстояние–время"? Об этом будет поведено в нашей статье.

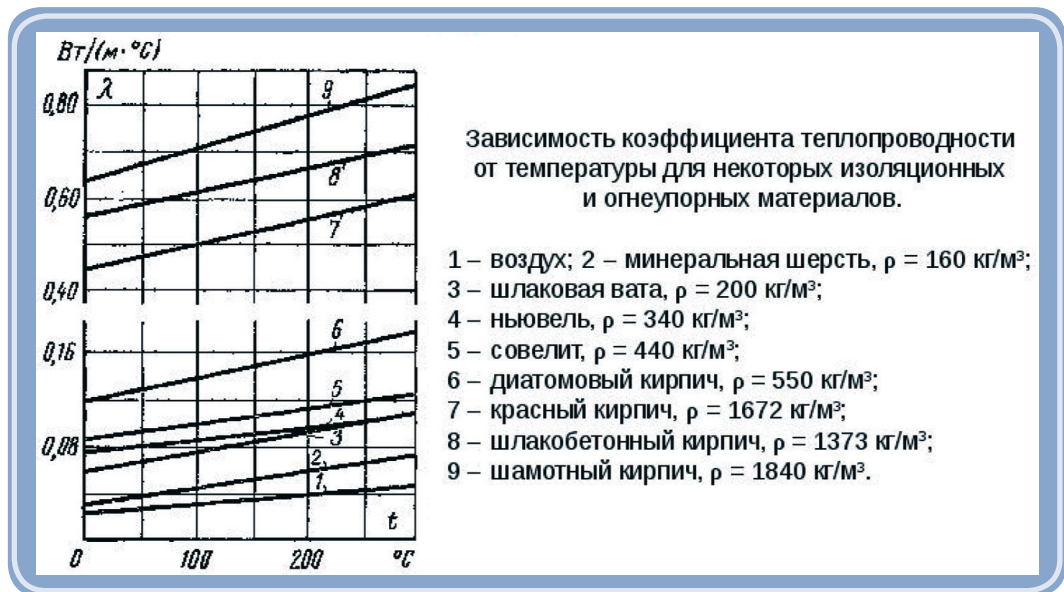
В ней рассказано о том, как можно и нужно вести расчёты на компьютере с использованием такой физической величины, как температура. И как можно проводить расчёты совсем без кельвинов, считая их составной и вспомогательной, а не базовой единицей измерения.

Рассказ будет опираться на пару простых расчётных примеров.

**Задача 1.** Необходимо узнать, какую теплопроводность имеет материал красного кирпича при температуре 20 °С. В наше время для этого мы не роемся в бумажных справочниках, а запускаем какой-либо поисковик интернета, вводим нужный запрос и выходим, к примеру, на сайт с адресом [https://myslide.ru/documents\\_7/2fc09c287fbee035e4c243ef3d7c85bbb/img31.jpg](https://myslide.ru/documents_7/2fc09c287fbee035e4c243ef3d7c85bbb/img31.jpg) с графиком, а также с поясняющим текстом – см. рис. 1.

Представленный здесь график создавался довольно давно. Это скан какого-то бумажного справочника середины прошлого века. Об этом свидетельствует, во-первых, нечёткое его изображение, во-вторых, единица температуры °С в единице теплопроводности и, в-третьих, слово "коэффициент" в названии транспортного свойства данного строительного материала (см. комментарии ниже). Тем не менее эту информа-

**Рис. 1.**  
Графики изменения теплопроводности материалов.



цию можно использовать для расчёта (оценки) теплопроводности красного кирпича при температуре 20 °С – см. рис. 2 с несложными выкладками (линейная интерполяция) в среде физико-математического пакета SMath<sup>1</sup>.

### **Ремарка о единице температуры в единице теплопроводности и о самой теплопроводности**

Во время посещения в США Национального института стандартов и технологий (НИСТ, [www.nist.org](http://www.nist.org)) первый автор этой статьи получил в подарок от американских коллег справочник по теплофизическим свойствам воды и водяного пара, в котором были две таблицы с такими заголовками:

Table U-6. Isobaric Heat Capacity of Water and Steam ( $\text{Btu} \cdot \text{lb}_m^{-1} \cdot ^\circ\text{R}^{-1}$ )

Table U-9. Thermal Conductivity of Water and Steam ( $\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-1} \cdot ^\circ\text{F}^{-1}$ )

Буква U в заголовках означает, что это таблицы с американскими единицами измерения. В подаренном справочнике были также и соответствующие таблицы с европейскими единицами теплоёмкости ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) и теплопроводности ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Таблицы с такими единицами были и в российском справочнике<sup>2</sup>, который первый автор данной статьи подарил коллегам из НИСТ (алаверды!).

В американской единице удельной изобарной теплоёмкости (таблица U-6) стоит градус Ренкина – °R, американский аналог европейского кельвина –  $\text{K} = 1.8 \text{ } ^\circ\text{R}$ . Но в американской единице теплопроводности (таблица U-9) вместо градуса Ренкина оказался градус Фаренгейта – °F. Когда автор спросил своих коллег из НИСТ, не опечатка ли это, они ответили, что это не опечатка и что скорее можно поменять Конституцию США, чем приучить американских инженеров, пользователей подобных таблиц, иметь градусы Ренкина вместо градусов Фаренгейта в единице теплопроводности. Тогда автор посоветовал американским коллегам для единообразия поменять градусы Ренкина на градусы Фаренгейта в единицах удельной изобарной теплоёмкости (таблица U-6). Автору ответили, что это будет совсем уж безграмотно и шокирует теперь уже специалистов-термодинамиков и что всем, увы, не угодишь. У нас, в СССР, в единице теплопроводности тоже раньше писали градусы Цельсия (см. рис. 1), считая их при этом по умолчанию равными градусам Кельвина, но потом со скрипом все же перешли на кельвины. Переход от термина “градус Кельвина” к просто кельвину тоже давался не так легко<sup>3</sup>, и мы к этому ещё вернёмся. Отсутствует единообразие и в терминологии. Многие отечественные теплофизики считают, что теплопроводность – это физическое явление с количественной оценкой – с единицей измерения, называемой коэффициентом теплопроводности (см. рис. 1). Метрологи же со своими стандартами настаивают на том, что коэффициент – это что-то безразмерное (коэффициент трения,

<sup>1</sup> Эту отечественную расчётную программу-импортзамениль можно за пару минут скачать с сайта [www.smath.com](http://www.smath.com) и бесплатно в базовой версии установить на своём компьютере. В расширенной лицензированной версии пакета присутствуют функции пакетов WaterSteamPro и CoolProp, возвращающие теплофизические свойства теплоносителей и рабочих тел теплоэнергетики – ту же теплопроводность, например.

<sup>2</sup> Александров А.А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики / Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 226 [8] с.: ил. (<http://tw.twt.mpei.ac.ru/rbtp>)

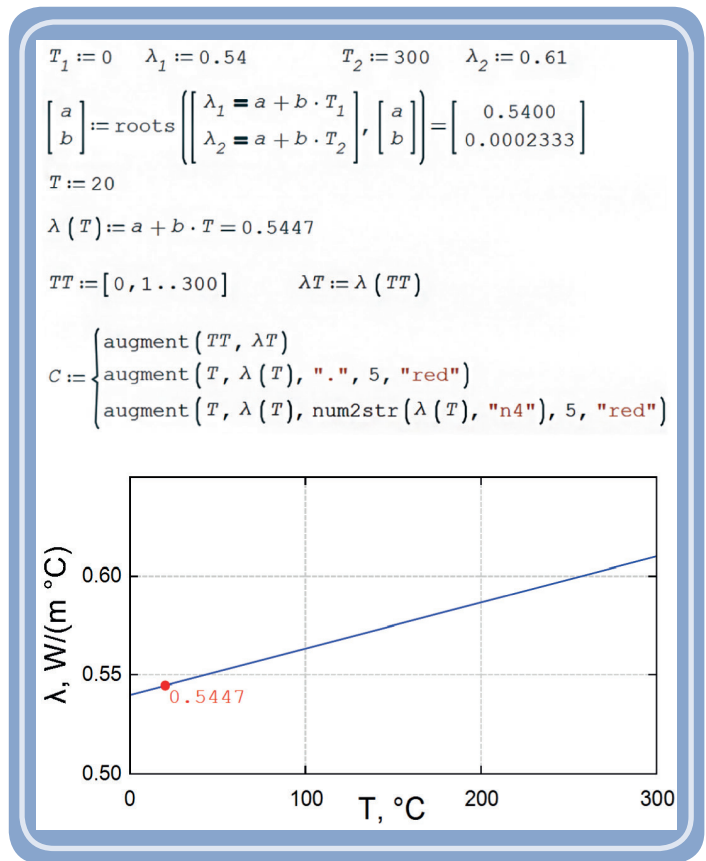
<sup>3</sup> Очков В.Ф., Орлов К.А. Градусы в физических величинах компьютерных вычислений // Мир измерений. 2020. № 3–4 (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Degrees.pdf>)

например), а теплопроводность – и физическое явление (транспортное свойство), и размерная единица измерения, так что термин “коэффициент” тут неуместен. Впрочем, коэффициент трения тоже не совсем безразмерная величина – это отношение силы, приложенной к телу для его перемещения, к весу тела – ньютонов к ньютонам, которые обычно сокращают. Сокращают также метры в единице теплопроводности, что мы ещё отметим ниже.

Зависимость теплопроводности материала красного кирпича от температуры линейная. На рис. 2 видно, как через поиск корня системы двух линейных уравнений с помощью встроенной в SMath функции roots определяются численные значения коэффициентов  $a$  и  $b$  зависимости  $\lambda = a + bT$  и далее рассчитывается значение теплопроводности при 20 °С с отображением данной красной точки на синем графике. Всё просто и понятно, но...

Расчёт на рис. 2 выдал так называемую эмпирическую формулу, работа с которой в современных расчётных компьютерных средах с опорой на единицы измерения, в среде SMath, например, требует некоторых ухищрений, представленных на рис. 3.

Первый вызов эмпирической формулы теплопроводности выдал ожидаемое сообщение об ошибке – коэффи-



**Рис. 2.** Нахождение зависимости теплопроводности от температуры без единиц измерения.

циент  $a$  безразмерен, произведение  $b$  на  $T$  имеет размерность температуры. Чтобы эмпирическое выражение  $\lambda = a + bT$  “захватило” температуру и выдало ответ с единицей теплопроводности, необходимо исходную переменную  $T$  лишить размерности температуры  $(T/K)^4$  и свести затем к шкале Цельсия  $(T/K - 273.15)$  – получить значение 20, а не 293.15 К. Требуется также приписать к ответу ба-

<sup>4</sup> Синий цвет и прямой шрифт у переменной  $K$  означает, что это единица измерения, а не пользовательская переменная.

$$T := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda := a + b \cdot T = \blacksquare \blacksquare$$

Единицы измерения не соответствуют.

$$\lambda := \left( a + b \cdot \left( \frac{T}{\text{K}} - 273.15 \right) \right) \frac{\text{W}}{\text{m K}} = 54.4667 \frac{\text{W cm}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$T := 68 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\lambda := \left( a + b \cdot \left( \frac{T}{\text{K}} - 273.15 \right) \right) \frac{\text{W}}{\text{m K}} = 0.3147 \frac{\text{BTU}}{\text{hr ft } \Delta^\circ\text{F}}$$

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}} = 1 \frac{\text{BTU}}{\text{lb } ^\circ\text{Ra}}$$

Рис. 3.  
Работа с эмпирической формулой.

зовую единицу теплопроводности  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Так необходимо работать с эмпирическими формулами<sup>5</sup> в среде SMath и других подобных средах (Mathcad, Maple Flow и др.). В расчёте на рис. 3 итоговая единица теплопроводности не упрощена до выражения  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  – в ней прописано вручную пользователем единица  $\text{W} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , что позволяет ясно видеть в ней закон Фурье: если взять стенку площадью один квадратный метр и толщиной в один сантиметр, то через неё будет проходить тепловая энергия мощностью 54.45 ватт при перепаде температур на двух противоположных сторонах стенки в один градус Цельсия (прошу простить: в один кельвин). Третий вызов эмпирической формулы теплопроводности материала красного кирпича ведётся с использованием “заокеанских” единиц измерения (см. заголовки таблицы U-9

<sup>5</sup> Очков В.Ф., Орлов К.А. Единицы измерений в трёх видах формул: в физических, эмпирических и... псевдоэмпирических // Мир измерений. 2021. № 1–2. (<http://twit.mpei.ac.ru/ochkovIPseudo.pdf>)

выше), которыми пользователь заменил европейские и получил соответствующее числовое значение. Кстати, сравнивая таблицу U-9 с расчётом на рис. 3, можно отметить разную в написании единиц измерения: Btu и BTU (британская тепловая единица), h и hr (час). И ещё одно кстати. Американских инженеров также нельзя приучить к использованию секунд, а не часов в единице мощности. И третье кстати –

последний оператор на рис. 3 показывает связь единиц (тепловой) энергии (килокалория-BTU), массы (фунт-килограмм) и температуры (кельвин-градус Ренкина) в европейских и американских вариантах.

На рис. 2 мы видим интерполяцию без задействования единиц измерения. Так обычно поступали и поступают при работе с языками программирования и электронными таблицами. Такую устаревшую манеру расчёта, чреватую ошибками, многие, увы, переносят и в современные расчётные программы – в SMath, например. Если же не игнорировать единицы измерения, то расчёт теплопроводности материала красного кирпича может вестись так, как показано на рис. 4, где коэффициенты  $a$  и  $b$  эмпирической зависимости стали размерными. Формулы в виде дроби, по которым рассчитываются эти коэффициенты, были получены в результате символьного (аналитического) решения системы уравнений, представленного на рис. 2 в первом аргументе функции roots. Эмпирическая формула, как известно, – это формула, полученная опытным (эмпирика!)

путём. Вследствие этого очень часто такие формулы включают в себя не просто физические величины, а физические величины, привязанные к заданным единицам измерения. Приём, показанный на рис. 3, позволяет обойти это ограничение и работать с любыми единицами температуры и теплопроводности. Есть, кстати, и псевдоэмпирические формулы (термин авторов), о которых рассказано в упомянутой выше статье (см. сноску 5). Таких формул очень много в справочниках, и с ними нужно быть осторожным при работе с современными расчётными программами с механизмом единиц измерения.

Возвращаясь к проблеме градусов Ренкина и градусов Фаренгейта, затронутой выше, можно отметить, что в средах SMath и Mathcad (американский аналог SMath) пошли на некий компромисс – ввели в расчёт единицы температуры –  $\Delta^\circ\text{C}$  (см. рис. 4) и  $\Delta^\circ\text{F}$  (рис. 3), численно равные кельвину и градусу Ренкина соответственно.

В расчётах на рис. 3 и 4 в переменные с именем  $T$  вводились не просто числовые значения, а числовые значения с привязанными к ним единицами температуры. А что хранят переменные  $T$ ,  $T_1$  и  $T_2$  в чреве компьютера? Чтобы ответить на этот вопрос, мы рассмотрим решение ещё одной простой задачи, но не по теплопередаче, а по термодинамике. Две эти дисциплины объединяет область знаний “Теоретические основы теплотехники”. На кафедре МЭИ с таким названием работают авторы данной статьи.

**Задача 2.** В баллоне объёмом 40 литров хранится кислород под избыточным давлением 150 бар. Барометр показывает атмосферное давление 745 мм ртутного столба. Температура баллона и газа  $10^\circ\text{C}$ . Определить мас-

$$\begin{aligned}
 T_1 &:= 0^\circ\text{C} & \lambda_1 &:= 0.54 \frac{\text{W}}{\text{m } \Delta^\circ\text{C}} \\
 T_2 &:= 300^\circ\text{C} & \lambda_2 &:= 61 \frac{\text{W cm}}{\text{m}^2 \text{ K}} \\
 a &:= \frac{\lambda_2 \cdot T_1 - \lambda_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} = 0.4763 \frac{\text{W}}{\text{m } \Delta^\circ\text{C}} \\
 b &:= \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{T_1 - T_2} = 23.3333 \frac{\text{mW cm}}{\text{m}^2 \text{ K}^2} \\
 T &:= 20^\circ\text{C} \\
 \lambda(T) &:= a + b \cdot T = 54.4667 \frac{\text{W cm}}{\text{m}^2 \text{ K}}
 \end{aligned}$$

**Рис. 4.** Нахождение зависимости теплопроводности от температуры с единицами измерения.

су кислорода в баллоне, опираясь на уравнение идеального газа, связывающее базовую тройку термодинамики: давление  $p$ , температуру  $T$  и удельный молярный объём – объём, который занимает моль газа с числом Авогадро атомов или молекул. Сразу вспоминаются школьные 22.4 литра – объём моля идеального газа при нормальных условиях. Метролог тут нас подправит – не литра, а дециметра кубического; литр это единица вместимости, а не объёма. В “старые школьные годы” утверждалось, что литр – это объём килограмма воды при нормальных условиях. Теперь же литр – это просто одна тысячная кубического метра.

На рис. 5 видно, как вводятся исходные данные задачи о баллоне с кислородом с преобразованием размерностей в базовые единицы SI. Затем

$$V := 40 \text{ L} = 0.04 \text{ m}^3$$

$$M_{O_2} := 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0.032 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$p_a := 745 \text{ mmHg} = 99325.1786 \text{ Pa}$$

$$p_{\text{изб}} := 150 \text{ bar} = 1.5 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$p := p_a + p_{\text{изб}} = 1.5099 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$T := 10 \text{ }^\circ\text{C} = 2354.2428 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$p \cdot v = T$$

$$v := \frac{T}{p} = 0.0001559 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

$$M := \frac{V}{v} \cdot M_{O_2} = 8.2095 \text{ kg}$$

Рис. 5.  
Определение массы кислорода в баллоне.

через несложные расчёты находится решение задачи – в баллоне хранится 8.2 килограмма кислорода. Примерно на такое значение уменьшится вес баллона, если из него выпустить кислород (степень наполнения баллонов со сжиженным газом “пропан–бутан” на заправках часто контролируется установкой баллона на весы).

В последнем предложении была намеренно допущена неточность: вес измеряют единицами силы, а не единицами массы – ньютонами, а не килограммами. Вес (сила тяжести) и массу часто

путают. Эти две физические величины связаны вторым законом Ньютона.

Представьте себе, что вы открываете учебник физики и видите там такую формулу  $ma = kF$  с пояснением, что это математическая запись второго закона Ньютона, где  $m$  – это масса (mass),  $a$  – ускорение (acceleration),  $F$  – сила (force), а  $k$  – универсальная силовая постоянная. Вы, конечно, удивитесь и скажете, что в этой формуле не должно быть никакой константы  $k$ . Но вам возразят в том плане, что постоянная  $k$  служит для того, чтобы перевести силу, выраженную в килограммах-силы, в ньютоны, а в константе  $k$  запрятако ускорение свободного падения. И пояснят, что люди уже давно привыкли выражать силу в килограммах-силы, а не в каких-то там непонятных ньютонах. Поэтому-то в данной формуле и стоит величина  $k$ , которая называется универсальной силовой постоянной (a force constant). Силу можно выражать и в других расхожих единицах – в динах, в фунтах-силы и проч. (см. их полный список, например, здесь: <https://www.calc.ru/Sila/?ysclid=lbxb3a3osr936832601>). Но всё это нужно сначала перевести в килограммы-силы, а уже потом вставлять полученную величину в формулу второго закона Ньютона  $ma = kF$ .

Но если мы откроем учебник по классической термодинамике (одного из разделов физики), то наяву увидим подобную “обременённую” константой  $R$  формулу  $pv = RT$  с пояснением, что  $p$  – это давление (pressure),  $v$  – удельный молярный объём (volume),  $T$  – температура (temperature), а  $R$  – универсальная газовая постоянная, служащая для перевода килограммов-силы, пардон, градусов Кельвина, ещё раз пардон, кельвинов в... правильные единицы температуры.

Так вот, в задаче о массе кислорода в баллоне было использовано пра-

вильное уравнение идеального газа  $pV = T$ , не отягощённое переводным коэффициентом  $R$ . Введённая температура  $10^\circ\text{C}$  хранится в памяти компьютера не в кельвинах, а в джоулях, делённых на моль. Остальные исходные величины хранятся в компьютере с привычными базовыми единицами SI: не в литрах, а в кубических метрах, не в граммах на моль (молярная масса

двухатомного кислорода), а в килограммах на моль, не в барах или мм ртутного столба, а в паскалях. Но температура, подчёркиваем ещё раз, хранится в единицах энергии, делённых на единицы количества вещества.

О том, что температура, выраженная в кельвинах и прочих температурных градусах, – это “сапоги всмятку”, знали давно. Вот что можно прочесть в пятом томе знаменитого курса теоретической физики Ландау и Лифшица<sup>6</sup>:

“...Температура имеет размерность энергии и потому может измеряться в единицах энергии, например, в эргах. Однако эрг оказывается... слишком большой величиной, и на практике принято измерять температуру в особых единицах, называемых градусами Кельвина или просто градусами. Переводной коэффициент между эргом и градусами называется постоянной Больцмана  $k = 1.38 \cdot 10^{-16}$  эрг/град. Мы условимся в дальнейшем во всех формулах подразумевать температуру, измеренной в энергетических единицах. Для перехода при численных расчётах

<sup>6</sup> Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. М.: Наука. 1960, 1981 ([https://scask.ru/c\\_book\\_t\\_phis5.php?id=11&ysclid=lbwktfyvnb53383477](https://scask.ru/c_book_t_phis5.php?id=11&ysclid=lbwktfyvnb53383477)):

к температуре, измеренной в градусах, достаточно просто заменить  $T$  на  $kT$ . Постоянное же использование множителя  $k$ , единственное назначение которого состоит в напоминании об условных единицах измерения температуры, лишь загромождало бы формулы”.

На рис. 6 показано, как в среде SMath введённая температура (двадцать градусов по шкале Цельсия<sup>7</sup>) переводится не в эрги, а в джоули с использованием встроенной константы – постоянной Больцмана  $k$ . Полученное числовое значение оказалось слишком маленьким. С ним очень сложно работать при ручных расчётах. Поэтому-то и ввели некие нормирующие коэффициенты (универсальную газовую постоянную и постоянную Больцмана), позволяющие перейти к “нормальной” шкале температур с именными градусами. Компьютер же совершенно спокойно оперирует любыми величинами, что и позволяет нам вернуть температуре её законную единицу измерения.

<sup>7</sup> Да, именно так, а не “десять градусов Цельсия”, которые можно трактовать как десять кельвинов.

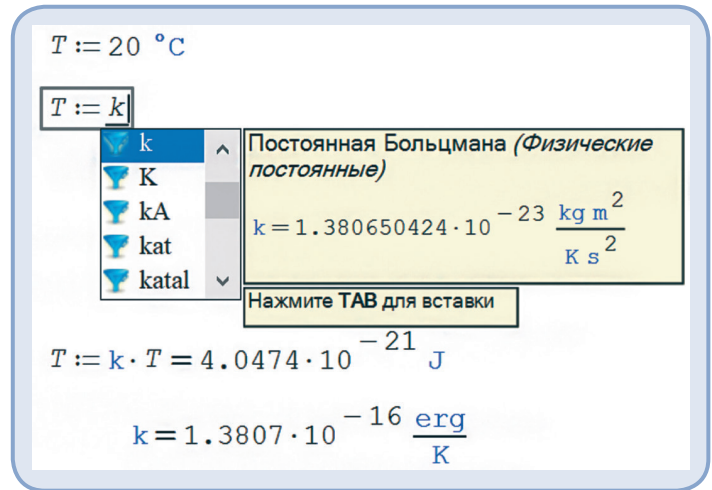


Рис. 6. Постоянная Больцмана в среде SMath.



Исторически сложилось так, что сначала появилось эмпирическое понятие температуры с разными именными градусами и шкалами (Фаренгейт – 1724 г., Реомюр – 1730 г., Цельсий – 1742 г. и др.), а только значительно позже, спустя целый век (1834–1874, Максвелл, Больцман, Клапейрон, Клаузиус, Менделеев и др.), было выведено теоретическое уравнение состояния идеального газа с температурой, которое пришлось подгонять под “градусы” вводом понятия “универсальная газовая постоянная”. Вот здесь и таится загадка о том, почему температура стала не просто отдельной физической величиной, а именно основной физической величиной в SI. А она должна быть величиной вспомогательной, что мы и пытаемся показать в нашей статье. Об этом косвенно свидетельствует и тот факт, что до 1968 г. кельвин официально именовался градусом Кельвина. А градусы в те времена повсеместно изгонялись из метрологии (см. сноску 3) и переводились в разряд вспомогательных величин. Вспомним угловые градусы, градусы твердости, градусы Энглера (вязкость жидкости), градусы жёсткости воды, алкогольные градусы и др. Да, градус Кельвина переименовали в кельвин. Но это похоже на то, как в “метрологическом доме” не провели генеральную уборку, а просто... замели мусор под ковер. Кстати, градус Ренкина (заокеанский аналог градуса Кельвина, кельвина – см. последний оператор на рис. 3) так и остался градусом Ренкина (°Re): ренкинов (единиц температуры) в метрологии нет и не предвидится. Есть в среде SMath и градус Реомюра (°Re). Читаем у Чехова в рассказе “Брожение умов”:

*“Земля изображала из себя пекло. Послеобеденное солнце жгло с таким усердием, что даже Реомюр, висевший*

*в кабинете акцизного, потерялся: дошел до 35,8° и в нерешимости остановился...”.*

Несложно подсчитать в среде SMath:  $35.8 \text{ }^\circ\text{Re} = 44.75 \text{ }^\circ\text{C}$  (вода при нормальном давлении кипит при  $80 \text{ }^\circ\text{Re}$  и замерзает при  $0 \text{ }^\circ\text{Re}$  или  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Упомянутый курс теоретической физики был написан в те времена, когда не было компьютерных инструментов работы с физическими величинами и приходилось пересчёты делать вручную или на логарифмических линейках. Затем появились электронные калькуляторы, “нефизические” языки программирования и электронные таблицы. В наше же время, повторяем, можно вернуться к истокам, к тому, что температура с позиций метрологии – это не отдельная физическая величина, а энергия, делённая на количество вещества с переводным коэффициентом, называемым универсальной

**Рис. 7.**  
**Истинные единицы некоторых физических величин.**

Теплопроводность	$\frac{W \cdot m}{m^2 \cdot \frac{J}{mol}} = 1 \frac{mol}{m \cdot s}$
Термическое сопротивление	$\frac{J}{\frac{mol}{W}} = 1 \frac{s}{mol}$
Удельная массовая теплоемкость	$\frac{J}{kg \cdot \frac{J}{mol}} = 1 \frac{mol}{kg}$
Удельная молярная теплоемкость	$\frac{J}{mol \cdot \frac{J}{mol}} = 1$
Удельная молярная энтропия	$\frac{J}{mol \cdot \frac{J}{mol}} = 1$

газовой постоянной (или постоянной Больцмана – см. рис. 6). Для этих целей (удобство ручных пересчётов) когда-то давно были введены децибелы, значения pH растворов и другие неододиницы измерения, в том числе и десятичные логарифмы. В современных компьютерных вычислениях они не нужны. Температурные и прочие градусы, децибелы и т.д. необходимы только для отображения результатов расчёта.

На рис. 7 представлено, с какими единицами будут храниться некоторые физические величины, в единицах измерения которых есть кельвины. При этом постоянная Больцмана численно будет равна обратной величине от числа Авогадро, а энтропия наконец-то станет безразмерной.

Спор о градусах температуры в единице теплопроводности (см. начало статьи) решается кардинально – нет там никаких единиц температуры, а есть только моли, метры и секунды – см. рис. 8.

Между прочим в единице температуропроводности (теплопроводность, делённая на удельную массовую изобарную теплоёмкость и на плотность) нет единиц температуры, а есть только метры квадратные, делённые на секунды. Ввод понятия температуропроводности было попыткой обойти физические нестыковки, связанные с эмпирическим подходом к температуре.

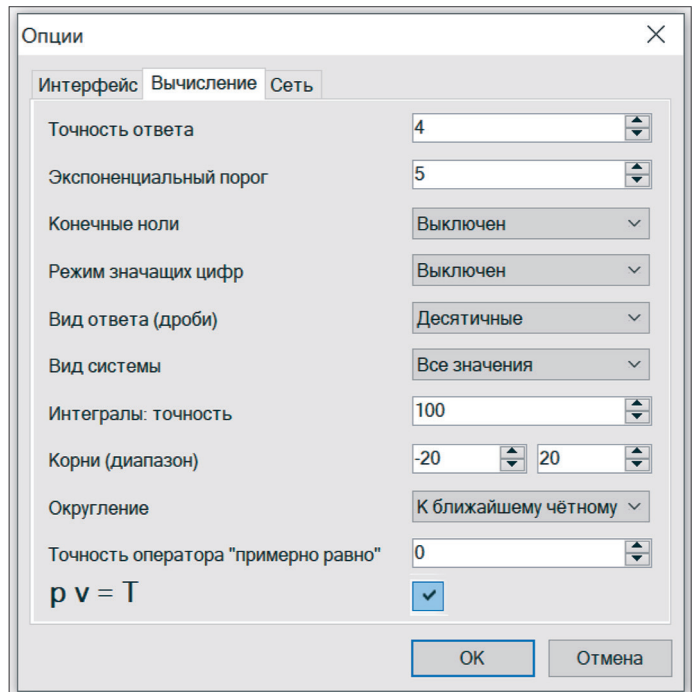
Отказ в компьютерных вычислениях от единицы температуры как одной из семи основных единиц SI может произойти не сразу, а с не-

$$\lambda := 54.47 \frac{\text{W cm}}{\text{m}^2 \text{ K}} = 6.5508 \frac{\text{mol cm}}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

Рис. 8. Базовая единица теплопроводности.

ким переходным периодом. На рис. 9 изображено окно настройки пакета SMath. В последней строке этого окна можно поставить “галочку” и перейти к трёхчленной, а не четырёхчленной формуле уравнения идеального газа. После этого температура, введённая в любых градусах и по любым шкалам, сначала будет переведена в кельвины, а затем умножением на универсальную газовую постоянную преобразована

Рис. 9. Переключатель в среде SMath на правильные единицы температуры (на правильное уравнение идеального газа).



"Энергия: экономика, техника, экология" 4'2023

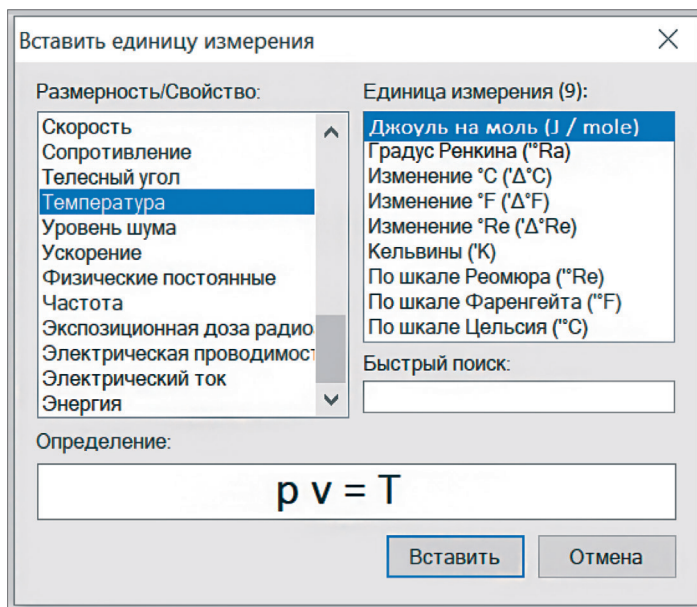


Рис. 10. Диалоговое окно ввода единиц температуры.



Рис. 11. Online-расчёт разности температур по международным шкалам 1968 и 1990 годов.

в числовую величину с составной единицей джоуль, делённый на моль.

На рис. 10 показано диалоговое окно ввода единиц температуры, в котором (после простановки “галочки” – см. рис. 9) появится на первом месте правильная единица температуры.

И ещё одно важное замечание. Возвращаясь к примеру 1 расчёта теплопроводности красного кирпича, сле-

дует отметить, что, скорее всего, те 20 градусов по шкале Цельсия в настоящее время уже не те 20 градусов по шкале Цельсия. Дело в том, что есть две международные температурные шкалы – 1968 и 1990 годов. Авторский расчётный сайт, показанный на рис. 11, позволяет вести пересчёты по данным шкалам.

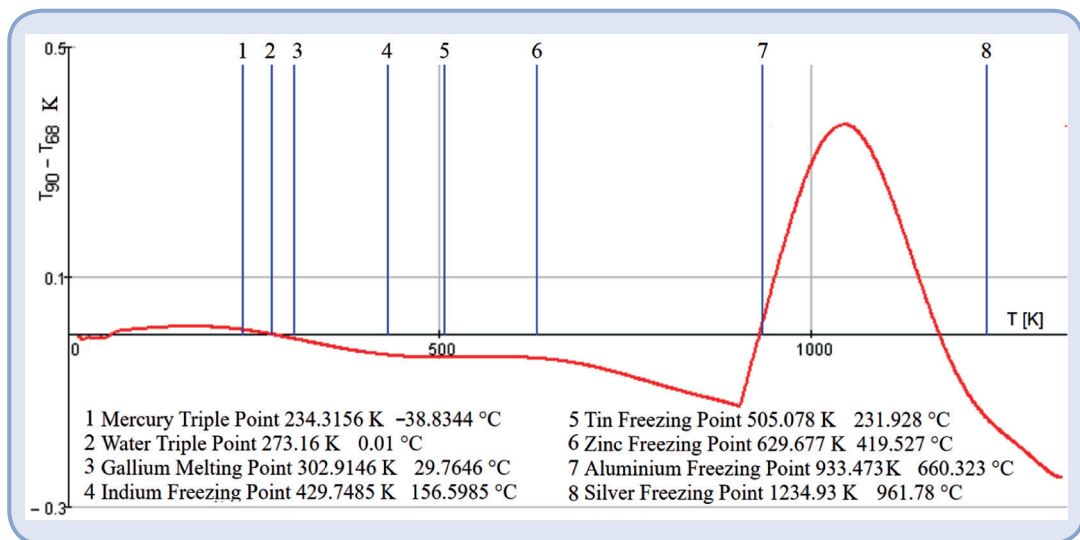
На рис. 12 представлен график разности температур по международным шкалам 1968 и 1990 годов с восьмью реперными точками. Он помещён на вышеописанном сайте, где также показаны и соответствующие расчётные формулы.

В принципе, при вводе температуры с вызовом диалогового окна на рис. 10 необходимо уточнять, какая международная температурная шкала имеется в виду. И вообще, механизм единиц измерения компьютерных программ требует подключения элементов искусственного интеллекта, и это тоже

тема разработки и исследования авторов статьи.

## Забавное метрологическое послесловие

Спор о единицах измерения, описанный в начале статьи, продолжился в аэропорту города Денвера, откуда американские коллеги провожали



**Рис. 12.**  
Графическое отображение  
разности температур  
по международным шкалам  
1968 и 1990 годов

первого автора этой статьи домой, вернее, в Нью-Йорк на пересадку. Вблизи этой столицы штата Колорадо находится город Боулдер с отделением НИСТ, где произошёл описанный обмен справочниками. Американский коллега заметил, что во всех аэропортах США используются только международные (европейские) единицы измерения. Если где-то просочатся американские единицы, то будет скандал, ЧП. Это связано, в частности, со знаменитым печальным случаем (см. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Планёр\\_Гимли](https://ru.wikipedia.org/wiki/Планёр_Гимли)), когда пассажирскому Боингу-767 с сотней пассажиров на борту пришлось аварийно сесть на заброшенном аэродроме из-за того, что при расчёте необходимого количества топлива перепутали американские и европейские единицы плотности авиационного керосина. Американский коллега шутя добавил, что если я замечу в этом аэропорте фунты-футы-фаренгейты, то он дарит бутылку хорошего бурбона. Автор стал вертеть головой и сразу заметил табличку с футами и дюймами на надземном переходе

между корпусами аэропорта, под которым проезжала наша машина. Такую маркировку ставят на всех мостах, под которыми проезжает автотранспорт. Американский коллега сказал, что он проиграл пари и что это опять же связано с тем, что проще "поменять Конституцию США", чем заставить американских водителей оперировать метрами и километрами, а не футами и милями. Кстати, на шоссежных дорогах Северной Америки легко узнать, где вы находитесь – в США, Канаде или в Мексике. Стоит только взглянуть на дорожную разметку и уточнить, что используется – мили или километры. И на границе Германии и немецкоговорящей Швейцарии нетрудно определить свое местоположение. Если вы идёте или едете по Straße, то это Германия, а если по Strasse – то Швейцария.

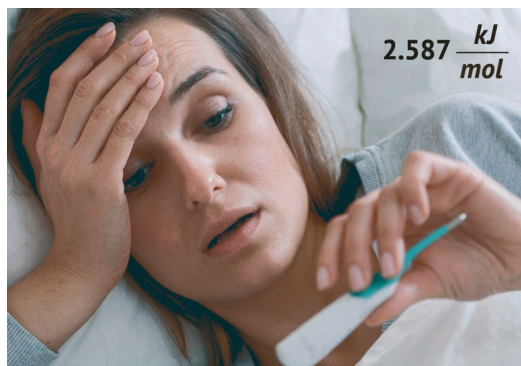


Рис. 13.

Читатели будут смеяться, но история про стандарты в справочниках и про бутылку спиртного “на спор” повторилась у первого автора статьи уже в Германии. Немецкий коллега дарил автору свой справочник по теплофизическим свойствам воды и водяного пара (опять алаверды!) и сказал, что если в справочнике найдётся хоть одна запятая вместо точки в качестве разделителя целой и дробной части чисел, то он ставит бутылку шнапса! Дело в том, что в это время Германия переходила на этот международный стандарт, и в справочниках наблюдалась путаница со “знаками препинания” в числах. Примерно такая, как была с градусами Цельсия–Фаренгейта и градусами Кельвина–Ренкина при работе с теплопроводностью. Но пакет SMath хорош и тем, что он предоставляет пользователю возможность выбора точки или запятой в десятичных числах. Так, между прочим, устроен табличный процессор Excel, которым многие пользуются при решении инженерных и научно-технических задач. Но эти таблицы не приспособлены для работы с единицами измерения, и это – причина многих ошибок в расчётах, связанных с неверным пересчётом единиц измере-

ния и складыванием “метров с килограммами”. В среде SMath, подчеркиваем ещё раз, подобные ошибки исключены.

## Выводы

Современные компьютерные расчётные программы позволяют наконец-то завершить длительный исторический процесс перехода на правильные единицы температуры. При этом остаётся возможность работы и с привычными температурными градусами и шкалами при вводе и выводе значений температуры и других величин, содержащих единицы температуры.

Спрашивается, а зачем это делать!? А затем, чтобы наконец-то навести порядок в системе единиц измерения. Убрать, например, такой разнობой, когда физики измеряют температуру в электронвольтах, а все остальные “нормальные люди” – в градусах Кельвина, Цельсия, Фаренгейта, Ренкина, Реомюра и др. При этом никто не собирается отменять, а тем более запрещать привычные шкалы и градусы температуры.

Ситуация, которую мы видим на рис. 13, может создаваться только при неверной настройке медицинского электронного термометра. Там, конечно, нужны градусы Цельсия или Фаренгейта. А ещё лучше просто лингвистические константы из теории нечётких множеств: “температура пониженная”, “температура нормальная”, “температура повышенная”, “температура высокая”, “жар” и др.

Но правда – это хорошо, а счастье лучше. Из-за этого принципа галочка на рис. 9 скорее всего никем и никогда не будет проставляться. Да и нет её в пакете SMath.