

$$p V = T$$

Валерий Очков

На примере решения несложных термодинамических задач обсуждается новая технология работы с температурой при компьютерных расчетах в средах физико-математических пакетов. Затрагиваются фундаментальные вопросы физики, связанные с системами физических величин. Температура рассматривается не как основная, а как производная физическая величина. Градус Кельвина (кельвин) исключается из расчетов. Побочно предлагается новая трехмерная диаграмма, отображающая формулицию IAPWS-IF97 по свойствам воды и водяного пара.

Внимание! Три важных предупреждения!

1. Эта статья, собственно, не о температуре как о физической величине, а о технологии работы с температурой в среде современных физико-математических компьютерных пакетов. Вернее так. Эта статья в первую очередь затрагивает вопросы компьютерной работы с физическими величинами, а во вторую очередь вопросы физики, системы физических величин.
2. Статью скорее всего не поймут и не оценят те, кто никогда не проводил расчеты с использованием единиц измерения в средах современных компьютерных физико-математических пакетов типа Mathcad, Maple, Mathematica, SMath и др. Более того, такие люди посчитают, что автор ничего не понимает в физике, в частности, в физической сущности температуры и «лезет со своим свиным рылом в калашный ряд».
3. Статья не призывает кардинально что-то менять в технологии ведения термодинамических расчетов. Статья призывает взглянуть на них критически и эту критику учесть при совершенствовании инструментария работы на компьютере с физическими величинами.

Ключевые слова: давление, объем, температура, закон идеального газа, универсальная газовая постоянная,

«Ну хорошо, электричество и теплота одно и то же, но возможно ли в уравнении для решения вопроса поставить одну величину вместо другой? Нет. Ну так что же? Связь между всеми силами природы и так чувствуется инстинктом...»

Лев Толстой «Анна Каренина»

Название статьи вдвойне необычно. Во-первых, оно состоит только из предельно короткой формулы (равенства) без какого-либо поясняющего текста, а во-вторых, прописанное *уравнение состояния идеального газа* (уравнение Клапейрона — Менделеева¹) приведено без традиционной буквы R — без универсальной газовой постоянной (a gas constant).

¹ Или Менделеева — Клапейрона. Авторство этой основной формулы классической термодинамики окончательно не установлено. Во многих странах Запада тут Менделеева вовсе не упоминают. Такая же примерно история случилась и с периодической таблицей химических элементов, которая является именной только в России (таблица Менделеева) и которая по легенде приснилась Менделееву. Говорят, что эта таблица сначала приснилась Пушкину, но он в ней ничего не понял. Такая же примерно история случилась и с данной статьей. Автор сначала показал её одному «авторитетному физики», но он в ней ничего не понял. Более того, он

Закон Ньютона и закон идеального газа

Представьте себе, что вы открываете учебник физики и видите в нем такую формулу $m a = k F$ с пояснениями того, что это математическая запись *второго закона Ньютона*, где m — это масса (**m**ass), a — ускорение (**a**cceleration), F — сила (**F**orce), а k — *универсальная силовая постоянная*. Вы, конечно, бы удивились и сказали, что в этой формуле не должно быть никакой буквы k . Но вам бы возразили в том плане, что постоянная k служит для того, чтобы перевести силу, выраженную в килограммах-силы в ньютон. И пояснили бы, что люди уже давно привыкли выражать силу в килограммах-силы (kgf), а не в каких-то там непонятных ньютонках(N)². Поэтому-то в этой 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. Но их все нужно сначала перевести в килограммы-силы, а уже потом вставлять полученную величину в формулу $m a = k F$, помня при этом, что $k = 9.80665$, и эта константа непрерывно уточняется.

Но если мы откроем учебник по классической термодинамике — одного из разделов физики, то мы наяву увидим подобную «обремененную» константой формула $p v = R T$ с пояснением того, что p — это давление (**p**ressure), v — удельный молярный объем (**v**olume), T — температура (**t**emperature), а R — *универсальная газовая постоянная*, служащая для перевода килограммов-силы, пардон, градусов Кельвина, ещё раз пардон, кельвинов в... правильные единицы температуры. В какие? Читаем статью дальше. Часто в этой формуле можно увидеть и еще одну переменную n или ν с пояснением того, что это молярная масса идеального газа. Разной там ещё тот! Почему это так? Это отдельная побочная тема статьи.

Накачиваем колесо велосипеда

Давайте для объяснения такого необычного названия статьи мы пока не будем вдаваться в физическую суть понятия температуры, а решим на компьютере несложную задачу из области термодинамики идеальных газов.

Задача. Нужно накачать колесо велосипеда³. Спрашивается, сколько качков поршневым насосом нужно сделать, чтобы поднять давление в шине от одной до пяти атмосфер. На рисунке 1 показана

сказал, что это сплошная чушь и рекомендовал статью больше никому не показывать. Тогда автор показал статью другому «авторитетному физику», и он в ней всё понял и высоко оценил статью. Правда, сказал при этом, что никакой «серьезный» журнал её не напечатает.

«Предшественниками» уравнения идеального газа были законы Гей-Люссака и Бойля-Мариотта. Учительница физики автора статьи не уставала повторять: «Дети, запомните! Гей-Люссак (Joseph Louis Gay-Lussac; 1778–1850) — это один человек, а Бойль-Мариотт — это два отдельных человека (Robert Boyle; 1627–1691 и Edme Mariotte; 1620–1684)». Вспоминается «открытие» времен перестройки и гласности, когда стало возможным критиковать «классиков»: «Оказывается, что Карл Маркс и Фридрих Энгельс — это не муж и жена, а четыре разных человека!».

Было предложение присвоить имя Дмитрия Ивановича Менделеева (1834 — 1907) составной единице энтропии и теплоемкости J/(K mol) и дать ей краткое обозначение Md (Мд по-русски). Но оно не прошло. Сказалась тут и давняя болезнь Запада под названием русофобия, которая временами находится в стадии ремиссии, а временами (как сейчас) обостряется. Правда, на Западе эту болезнь называют по-другому и считают, что ею болеет не Запад, а Россия. Но истина, как всегда, находится где-то посередине.

² В школьные годы автор с друзьями прикалывался в магазине — просил продавщицу отвесить 1000 ньютон колбасы. Ведь, вес, как учили нас в школе на уроках физики, это сила, а силу отмеряют ньютонками, а не граммами или килограммами, как массу.

³ Автор заядлый велосипедист. Вот неполный перечень городов вне России, где он катался на собственном или арендованном велосипеде (велике, байке): Нью-Йорк, Бостон, Денвер, Боулдер (США), Амстердам, Арнем (Нидерланды), Берлин, Мюнхен, Дрезден, Нюрнберг, Фрайбург, Штутгарт, Циттау, Эрланген (Германия), Сиань (Китай), Лондон (Англия), Паланга (Литва), Прага, Пльзень, Карловы Вары (Чехия), Линц, Зальцбург (Австрия), Базель, Люцерн (Швейцария), Стокгольм (Швеция)...

схема задачи, а на рисунке 2 её решение в среде *модернизированной автором* (подчеркиваем!) программы Mathcad.



Рис. 1. Схема задачи о накачке колеса велосипеда

В задаче три допущения:

1. Камера велосипеда — это тор, который не меняет свой объем при накачивании: покрышка достаточно жесткая — процесс в камере изохорный.
2. Температура воздуха в камере и насосе почти не меняется. Воздух за счет теплообмена с окружающей средой успевает при каждой качке насоса охладиться до температуры, близкой к температуре окружающей среде, (процесс почти изотермический). Для этого необходимо накачивать колесо велосипеда медленно, плавно⁴. Плавность накачивания позволяет не принимать во внимание и возможное дросселирование воздуха в ниппеле колеса.
3. Нет утечки воздуха из насоса.

На рисунке 2 показан протокол решения задачи методом последовательных приближений, методом «научного тыка». Задается число качков насоса n , которое корректируется в зависимости от рассчитанного значения давления в шине p_n .

⁴ Сразу вспоминается «Соло на ундервуде» Сергея Довлатова. «У одного знаменитого режиссера был инфаркт. Слегка оправившись, режиссер вновь начал ухаживать за молодыми женщинами. Одна из них деликатно спросила:

— Разве вам ЭТО можно?

Режиссер ответил:

— Можно... Но плавно...»

Если б это был не режиссер, а физик (знаменитый Лев Ландау, например, — ещё тот ловелас!), то он сказал бы так: «Можно. Но плавно, изотермически».

Сейчас такое поведение на английский манер называется харассментом. В «Мастере и Маргарите» Булгакова Фагот жаловался Воланду на директора варьете Степу Лиходеева: «вообще они в последнее время жутко свинячат. Пьянствуют, вступают в связи с женщинами, используя свое положение».

В начале расчета задаются геометрические размеры шины велосипеда и велосипедного насоса. Шина, как уже сказано, — это тор с малым радиусом r и большим радиусом R , а насос — это цилиндр с диаметром d и с высотой H (ход поршня насоса). Введенные значения r , R , d и H позволяют рассчитать объемы этих геометрических тел (6.477 литра и 283 миллилитра⁵). Сразу подчеркнем особо, что пакет Mathcad работает с единицами физических величин, что делает расчеты комфортными, исключает пересчеты и многие возможные ошибки в них, позволяет навскидку подбирать правильные формулы для расчетов [1, 2]. А автоматическая работа с единицами физических величин — это главная тема статьи! Далее в расчет вводятся давление p_0 и температура T_0 окружающей среды, откуда забирается воздух. Давление вводится в атмосферах физических (1 atm = 760 мм ртутного столба), которые сразу переводятся в паскали (основная единица давления в SI, на которую по умолчанию ориентирован пакет Mathcad). А вот работа с температурой («гвоздь» программы, пардон, статьи) ведется по-новому. Введенное значение переменной T_0 (18 градусов по шкале Цельсия⁶) сначала переводится на шкалу Кельвина (абсолютная термодинамическая температура $18 + 273.15 = 289.15$ — это делает и обычный Mathcad), а затем эту величину авторский Mathcad умножает на уже упомянутую универсальную газовую постоянную $R = 8.314 \text{ J/mol/K}$. Результат (2421 J/mol) и выводится на печать по умолчанию, но пользователь вправе заменить эту экзотическую единицу температуры на более привычные кельвины, градусы Ренкина, градусы Фаренгейта...

Универсальная газовая постоянная R потеряла свой статус физической константы и переместилась из уравнения состояния идеального газа в инструмент ввода в компьютерный (подчеркиваем) расчет температуры. Теперь это не физическая константа, а просто рядовой переводной коэффициент работы с единицами температуры. Но это не только некий чисто компьютерный прием — это восстановление физической справедливости, если так можно выразиться. Мы это обсудим ниже.

⁵ Округление ведется при выводе ответа на печать с ручной заменой единиц физических величин. В недрах же компьютера эти значения хранятся в метрах кубических (основная единица объема в SI, на которую по умолчанию ориентирован пакет Mathcad) и с максимальной точностью в 15 значащих цифр.

⁶ Человек, упомянутый в пункте 2 Предупреждений в «шапке» статьи, тут сразу огульно обвинит автора ну не в безграмотности, так в некой грубой термодинамической неаккуратности. Он скажет, что если температура вводится в градусах Цельсия (относительная шкала), то обязательно нужно использовать прописную букву t . Если же температура вводится в кельвинах (абсолютная шкала), то необходимо работать с заглавной буквой T . Эмоциональный преподаватель в такой ситуации выгонит студента с семинарских занятий по термодинамике. Да ещё будет вослед ему топтать ногами и улюлюкать! Автор тут спрашивает таких преподавателей, а почему они не используют прописную букву p , когда вводят избыточное давление в атмосферах, и заглавную букву P , когда вводят абсолютное давление в паскалях? Да, автоматический пересчет единиц измерения в среде физико-математических программ, устранил «раздвоение личности» у переменных, хранящих значение температуры. Но нужно сделать и второй шаг — изгнать четвертую величину в уравнении идеального газа. Это и является главной темой статьи. Есть ещё и третий шаг, о котором пока умолчим.

$$r := 50 \text{ cm} \quad R := 55 \text{ cm}$$

$$V_o := \frac{1}{4} \pi^2 \cdot (R+r) \cdot (R-r)^2 = 6.477 \text{ L}$$

$$p_o := 1 \text{ atm} = (1.013 \cdot 10^5) \text{ Pa}$$

$$T_o := 18 \text{ }^\circ\text{C} = (2.421 \cdot 10^3) \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$p_o \cdot \frac{V_o}{x_o} = T_o$$

$$x_o := p_o \cdot \frac{V_o}{T_o} = 0.271 \text{ mol}$$

$$H := 40 \text{ cm} \quad d := 3 \text{ cm} \quad V_{\text{pump}} := \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot H = 283 \text{ mL}$$

$$p_o \cdot \frac{V_{\text{pump}}}{x_{\text{pump}}} = T_o$$

$$x_{\text{pump}} := p_o \cdot \frac{V_{\text{pump}}}{T_o} = 0.012 \text{ mol}$$

$$n := 88$$

$$\Delta T := 10 \text{ }^\circ\text{C} = 83.145 \frac{\text{J}}{\text{mole}}$$

$$p_n \cdot \frac{V_o}{x_o + n \cdot x_{\text{pump}}} = T_o + \Delta T$$

$$p_n := \frac{T_o + \Delta T}{\frac{V_o}{x_o + n \cdot x_{\text{pump}}}} = 5.008 \text{ atm}$$

Рис. 2. Расчет процесса накачивания колеса велосипеда

В расчете на рис. 2 нет комментариев – единицы измерения заодно выполняют их роль. Вкупе с именами переменных.

После ввода исходных данных рассчитывается начальное количество воздуха в камере велосипедного колеса x_o в молях⁷. Далее предполагается, что температура воздуха в процессе его сжатия повысится на десять градусов Цельсия (на десять кельвинов). Величина ΔT выводится для контроля на печать с правильной единицей температуры — джоуль, деленный на моль. После этого через наше упрощенное уравнение идеального газа ($p V = T$, а не $p V = R T$) рассчитывается давление в камере колеса велосипеда после 88 качков насоса: температура по нашему допущению повысилась на десять градусов Цельсия⁸, но объем камеры велосипеда не изменился — изменился удельный молярный объем, объем, деленный на количество воздуха (в молях). И нигде в протоколе расчета не видно величины R — универсальной газовой постоянной. Вскользь отметим, что это и ускоряет расчеты — величина R незаметно используется только один раз при вводе значения температуры для перевода

⁷ Мы никогда не говорим так: масса чего-то там в килограммах, а просто говорим масса. Но в случае с количеством вещества приходится уточнять, что данная величина задается именно в молях. Иначе выражение «количество воздуха» можно неверно трактовать как масса воздуха или объем воздуха.

⁸ В среде Mathcad есть не совсем обычная единица температуры $\Delta^\circ\text{C}$, численно равная кельвину. Это сделано специально для тех, кто по старинки измеряет разность температур градусами Цельсия. Есть и вторая такая странная единица температуры $\Delta^\circ\text{F}$, численно равная градусу Ренкина.

кельвинов в джоули, деленные на моль. Отметим и такой нюанс — переменная R у нас освободилась для хранения радиуса колеса велосипеда⁹. И никакой универсальной газовой постоянной в расчете нет! Этой постоянной, слава богу, не присвоили имя какого-либо выдающегося ученого (вспомним постоянную Больцмана, постоянную Планка и др.). Поэтому её безболезненно можно перевести из ранга констант в ранг ординарного переводного коэффициента единиц температуры. Никто не будет обижен!

Нет никакой температуры!

"По крайней мере, знаете Манилова?" сказал Чичиков.

"А кто таков Манилов?"

"Помещик, матушка".

"Нет, не слыхивала, нет такого помещика".

Н. В. Гоголь «Мертвые души»

Дело в том, что и в жизни, и в физике по сути нет никакой температуры, а есть энергия молекул и других элементарных частиц, энергия связи атомов и молекул, которую интерпретируют как температуру. Это утверждение, естественно, касается только идеального случая — идеальных газов, если говорить о термодинамике. В реальной жизни с реальными газами и веществами (см. рис. 3) всё намного сложнее. Вот один пример из множества подобных. Вы кипятите воду в чайнике.

Температура кипящей воды и насыщенного пара одинаковы, но их энергии разные! Почему? А потому, что это не идеальный случай, а реальная жизнь, о которой будет рассказано ниже. В физике плазмы, в физике элементарных частиц, например, где всё намного проще и всё намного сложнее, и нет явных фазовых переходов первого рода, температуру часто измеряют электронвольтами (одна из единиц энергии), подразумевая при этом, что количество вещества — это безразмерная величина. Комнатная температура — это примерно одна сороковая электронвольта. А электронвольт как единица температуры — это заряд электрона, умноженный на вольт (единица электрического напряжения) ¹⁰, пакет Mathcad, повторяем, по умолчанию работает с SI, где семь базовых единиц измерения¹⁰, включая и температуру (кельвин — kelvin¹¹), и количество вещества (моль — mole). Но до сих пор многие физики при расчетах предпочитают работать с «беззаконной» системой CGS (СГС — сантиметр-грамм-секунда), где только три базовые, основополагающие, понятные всем величины (пространство, масса и время) и где температура и количество вещества находятся на неких «птичьих правах». Система CGS, на которую можно перейти в среде Mathcad, — это по своей сути не «чистокровная» система CGS, а некий компромиссный гибрид, некий метис систем SI и CGS.

Дело в том, что исторически сложилось так, что сначала в физике появилось эмпирическое понятие температуры с разными именными градусами и шкалами (Фаренгейт — 1724 г., Реомюр — 1730 г., Цельсий — 1742 г. и др.), а только потом (1834 — 1874, Максвелл, Больцман, Клапейрон, Клаузиус, Менделеев и др.). Здесь обязательно нужно упомянуть Сади Карно (Nicolas Léonard Sadi Carnot; 1796–1832), который в работе 1824 г. сформулировал основополагающие понятия теплофизики: цикл Карно, второе начало термодинамики. И только после всего этого было выведено теоретическое

⁹ В среде Mathcad Prime (современная версия Mathcad), стало возможным иметь в расчетах одноименные разные переменные, отличающиеся друг от друга стилем. Так переменная R зарезервирована для хранения и универсальной газовой постоянной, и градусов Ренкина. Внешне они по умолчанию отличаются цветом — константа зеленая, а единица физической величины — синяя.

¹⁰ Нужно говорить и писать не *единицы измерения*, а *единицы физических величин*. Но есть и экономические величины (рубли, доллары, евро...), величины измерения информации (биты, байты...). Как тут быть?

¹¹ Заметим, что для ученого высшей оценкой его заслуг будет то, что его фамилию напишут строчной (маленькой), а не прописной (заглавной, большой) буквой: Не Кельвин (Томпсон, 1824–1907), а кельвин. В статье, например, был упомянут и Блез Паскаль (1623–1662), давший имя базовой единице давления. Можно продолжить: вольт, ампер, кулон, стокс... — целая вереница основных и вспомогательных единиц физических величин, названных в честь знаменитых и не очень знаменитых ученых. Крайне почетно также если фамилию сократят до одной-двух букв: не Кельвин, а K , не Паскаль, а Pa , не дедушка, а de , не бабушка, а ba (шутка)!

уравнение состояния идеального газа с температурой. Это уравнение и пришлось подгонять под «градусы», вставив в него эту самую «универсальную газовую постоянную». 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 вспомогательной величиной, что мы и пытаемся показать в этой статье. Об этом косвенно свидетельствует и тот факт, что до 1968 года кельвин официально именовался градусом Кельвина. А градусы в те времена повсеместно изгонялись из метрологии [3] и переводились в разряд вспомогательных величин. Вспомним угловые градусы, градусы твердости, градусы Энглера (вязкость жидкости), градусы жесткости воды, алкогольные градусы и др. Да, градус Кельвина переименовали в кельвин. Но это похоже на то, как в «метрологическом доме» не стали капитально прибираться, а просто замели мусор под ковер. Логика тут простая и понятная. Ведь, мы говорим градусы Ньютона или градусы Паскаля, когда речь идет о силе или давлении! Кстати, градус Ренкина (заокеанский аналог градуса Кельвина, кельвина) так и остался градусом Ренкина: ренкинов (единиц температуры) в метрологии нет и не предвидится.

При ручных расчетах и при расчетах в программных средах без инструментария работы с физическими величинами (электронные таблицы, языки программирования), можно использовать старое уравнение идеального газа с четырьмя переменными — с тремя термодинамическими величинами (давление-объем-температура) и одной константы — универсальной газовой постоянной. Переход же к расчетам в средах современных физико-математических программ с инструментами работы с физическими величинами (Mathcad, Maple, Mathematica, SMath и др.) дает шанс вернуть в расчеты некое подобие истинной физики и изгнать окончательно из расчетов градусы Кельвина (кельвины) не только формально («заметание мусора под ковер»), но и по существу. Пользователи же физико-математических пакетов вправе работать с любыми единицами температуры — с привычными, но неправильными градусами или с правильными, но непривычными джоулями, деленными на моль (см. рис. 2). Или просто с джоулями — см. название статьи, где прописана прописная (пардон, за тавтологию) буква V (объем), а не строчная буква v (удельный молярный объем). Джоуль (не единица энергии, а человек), напомним, первым нашел эквивалент между механической (электрической — см. эпиграф статьи [4]) работой и тепловой энергией. Этот факт даже зафиксирован на надгробной доске Джоуля в Вестминстерском аббатстве¹².

В заключение переиначим эпиграф этого раздела статьи – диалог Чичикова с Коробочкой:

"По крайней мере, знаете температуру?"

"А что такое температура?"

"Физическая величина, матушка, в SI одна из семи основных!"

"Нет, не слыхивала, нет такой физической величины".

Системы физических величин

В системе физических величин SI, откровенно говоря, царит полный бардак. Про незаслуженно возведенную в степень основной единицы – единицу температуры кельвин мы уже написали. Основная единица массы оказалась с кратным множителем кило¹³. Моли — это просто штуки, такие,

¹² В калории (тепло) примерно 4.19 джоуля (работа). Автор предлагает 19 апреля каждого года праздновать День теплотехника. По образцу дня математика, какой отмечают 14 марта (3.14).

¹³ Единица массы $мкг$ — это что? Микрограмм (мк-г) или милликилограмм (м-кг), то есть просто грамм? Килограмм отвязали от платинового эталонного цилиндра и привязали к постоянной Планка. Это похоже на шутовскую запись в учебнике по программированию: «Рекурсия — см. статью «Рекурсия». «Килограмм — см. статью «Килограмм». Постоянную Планка сначала привязали к килограмму, а потом килограмм привязали к постоянной Планка. Такой же курьез случился и с градусом Кельвина. Постоянную Больцмана сначала привязали к кельвину, а потом кельвин привязали к постоянной Больцмана.

как «десяток», «дюжина», «сотня». Вылезла какая-то непонятная эмпирическая кандела¹⁴, но остались за бортом единицы стоимости, количества информации¹⁵... Единицы времени так и остались недесятичными. Предписано приставки для дольных единиц (деци, санти, милли и т. д. до иотто) писать маленькими буквами, а приставки для кратных единиц (дека, гекто, кило, мега, гига и т. д. до иотта) писать большими буквами, по с тремя исключениями для дека, гекто и кило. Малоизвестных, почти забытых физиков «наградили» именными единицами измерения, а заслуженных корифеев обошли (Менделеева, например – см. сноску 1, а имя Эйнштейна дали единице, которую никто сразу и не вспомнит, и т. д.). Нобелевские премии в какой-то мере исправляют это ненормальное положение вещей. Ровно семь основных физических величин (пространство, масса, время, сила тока, количество вещества, сила света и наша злополучная температура) — это не какая-то основополагающая физическая сущность мироздания, а скорее мистика, магия цифр: семь цветов спектра, семь нот звукоряда, семь дней недели, семь гномов, семь богатырей, семь чудес света, семь древних мудрецов, семь смертных грехов, семь рисунков и семь литературных ссылок в этой статье... В этот ряд разработчики SI приписали и семь основных физических величин.

«Полный бардак» — это, конечно, автор погорячился. Исправимся и скажем, что система единиц физических величин SI крайне компромиссна¹⁶ и крайне несовершенна. Но несовершенен и наш мир! В связи с этим вспоминается старая философская притча о том, как один клиент долго ждал своих заказанных брюк и упрекнул портного, сказав ему, что Господь Бог создал мир за семь дней, а он (портной) возился со штанами целый месяц. Портной не растерялся и ответил так: «Посмотрите на этот мир и посмотрите на эти брюки!».

Коэффициенты сжимаемости и идеальности

Если говорить не об идеальном газе, а о реальных веществах — газах и жидкостях, то для описания их термодинамических свойств можно вернуть четвертую переменную в уравнение состояния: не $p v = T$, а $p v = k T$, где переменная k зависит от давления и температуры и меняется от единицы (идеальный газ) до почти нуля (несжимаемая жидкость). Обратная величина от k называется коэффициентом (фактором) сжимаемости. Коэффициент k можно назвать коэффициентом (фактором) «расширяемости». Коэффициент k можно назвать и коэффициентом идеальности реального газа при заданных параметрах. На каких-то участках коэффициент k меняется скачком, что связано с фазовыми переходами первого рода (кипение-конденсация, возгонка-сублимация, плавление-кристаллизация).

На рисунке 3 контурным графиком (линиями одного уровня) отображена зависимость переменной k для воды и водяного пара от давления и температуры. График построен в среде Mathcad с использованием авторской программы WaterSteamPro® (www.wsp.ru). Расцветка графика сделана по схеме радуги: красный цвет — это значения коэффициента k , близкие к единице (идеальный газ — водяной пар с низким давлением и высокой температурой¹⁷), фиолетовый же цвет — это значения

¹⁴ Единица силы света есть, а единицы силы запаха нет... Единица силы звука вообще не единица, а логарифм отношения, к которому еще и множитель приставили – децибел.

¹⁵ Количество информации, кстати, можно успешно измерять молями, а не битами, байтами, килобайтами и проч (<https://community.ptc.com/t5/PTC-Mathcad/Bit-byte-kB-MB-GB-etc-in-SI-and-in-Mathcad/m-p/758034>).

¹⁶ Мастер политических компромиссов Талейран (Charles Maurice de Talleyrand-Périgord; 1754–1838) имел дело и с метрологией. Опасаясь якобинского террора, он запросил у Дантона служебную командировку в Англию в том числе и для разработки единой системы мер и весов. Вернулся во Францию Талейран уже после казни на гильотине и Дантона, и Робеспьера без какой-либо разработки единой для Франции и Англии системы единиц, но с сохраненной жизнью. Некой реинкарнацией Талейрана в советские времена был Анастас Микоян, про которого говорили так: «От Ильича до Ильича без инфаркта и паралича!». Под Ильичами подразумевались Ленин и Брежнев.

¹⁷ В Москве работает Институт высоких температур РАН, а в Киеве есть Институт низких температур НАН Украины. Можно предположить, что где-то должен быть и Институт средних температур. В СССР было

коэффициента k , близкие к нулю, (вода с низкой температурой под низким давлением). В середине рисунка 3 линии одного уровня сливаются в одну, образуя так называемую линию насыщения воды и водяного пара, простирающуюся от тройной точки, где одновременно присутствуют лед, вода и водяной пар, то критической точки, где вода перестает качественно отличаться от водяного пара. Но правильнее нужно говорить не кривая насыщения, а поверхность насыщения и не тройная точка, а тройная линия. Если контурный график на рис. 3 преобразовать в поверхность, добавив третью координату — удельный объем (плотность), то получится так называемая *термодинамическая поверхность воды и водяного пара*, где будут четко видны и поверхность насыщения, и линия тройной точки. С этой поверхностью можно поработать в среде авторского online расчета [5] по адресу <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/WSP/VTPs.xmcd>. Там можно изменить давление и температуру, построить на поверхности изобару и изохору, а также узнать, чему равен удельный объем воды или водяного пара в точке их пересечения.

министерство тяжёлого машиностроения, министерство среднего машиностроения (современный Росатом) и... министерство легкой промышленности. Институт высоких температур фигурирует в такой байке. Христианство возникло в атмосфере ожидания близкого конца Света. Конец Света, слава богу, не наступил, и христианство перешло в аварийный режим работы. Академия наук СССР работала в основном на атомную войну. Она, к счастью, не случилась, и академия наук перешла в аварийный режим работы – превратилась в РАН. Институт высоких температур создавался и развивался в том числе и для создания МГД-генераторов электрического тока. Эти генераторы так и не заработали, и ИВТАН перешел на аварийный режим работы – был преобразован в ОИВТ РАН. В наши дни делаются серьезные попытки вывести некоторые научные организации у нас в России и на Западе из «аварийного режима работы» за счет возрождения гонки вооружений.

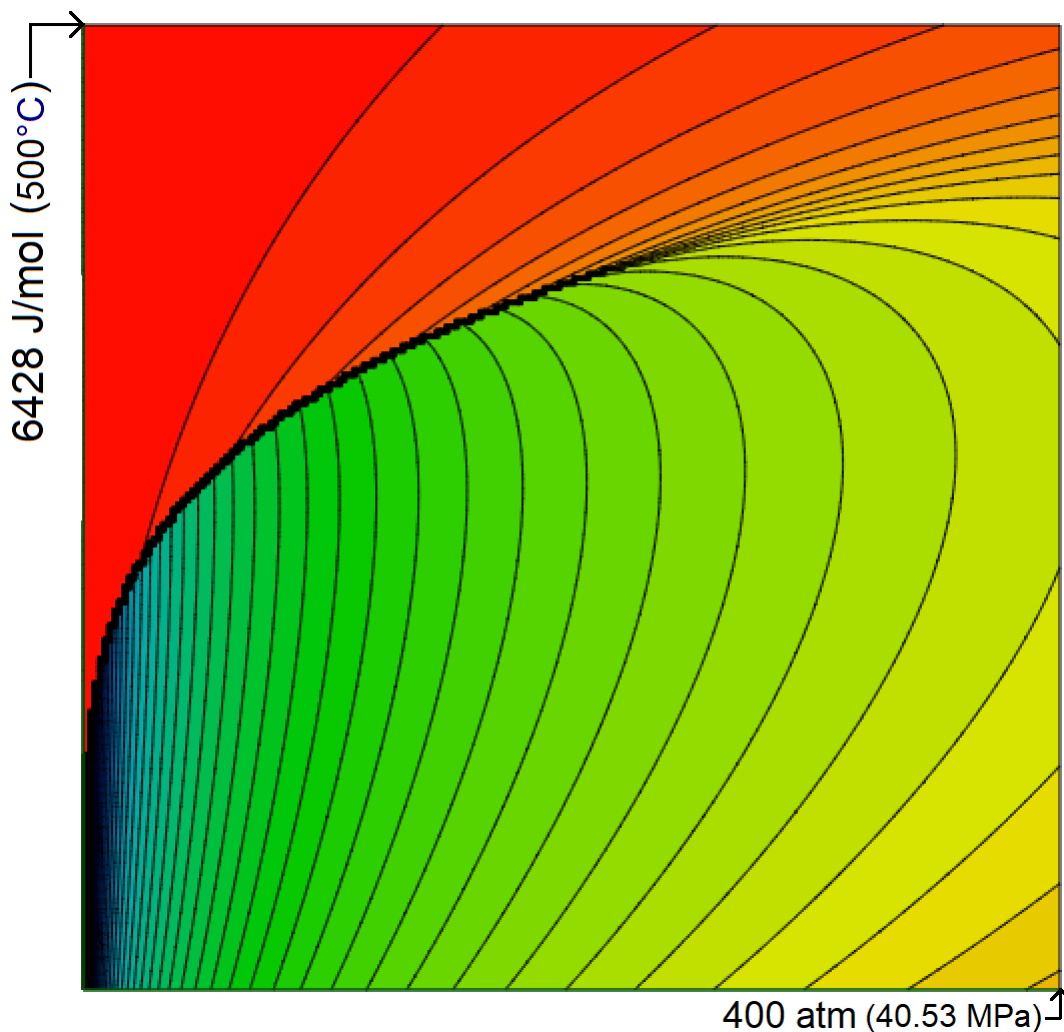


Рис. 3. Коэффициент (фактор) «расширяемости» воды и водяного пара в зависимости от давления и температуры

Если идти направо от левого верхнего угла диаграммы на рис. 3 по горизонтальной прямой-изотерме до правого угла, затем опускаться вниз до нижнего угла по прямой-изобаре, а потом перейти в левый нижний угол, то значения параметра f изменятся так: 1, 0.625, 0.315 и... два значения: единица для воды и нуль для водяного пара на концах тройной линии. Цвет же диаграммы будет меняться так: «Каждый охотник желает знать, где сидят фазаны» (Richard Of York Gave Battle In Vain или Roy G. Biv, the Rainbow Man).

Неравновесность реального вещества

Значение коэффициента k зависит не только от давления и температуры, но и от других факторов. Если, например, в докритической области изохорно поднимать температуру, то значение k при пересечении линии насыщения может возрастать не ступенькой, а неким пологим «пандусом». Это явление связано с перегревом насыщенной воды. Если идти вниз и изохорно уменьшать температуру перегретого пара, то может наблюдаться процесс переохлаждения водяного пара. И все это как в случае с велосипедным насосом определяется скоростью охлаждения или нагрева. Если всё делать достаточно плавно (вспомним знаменитых режиссёра и ученого — см. сноску 4), то нестабильных термодинамических проблем не будет. Не будет и нового инфаркта у режиссёра и физика!

Формуляция IAPWS-IF97

Диаграмма на рис. 3 построена на основании формуляции IAPWS-IF97, разработанной Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (www.iapws.org), в которой с 2007 года работает автор. Не привычное для русского уха слово *формуляция* означает набор формул с поясняющими текстами и с примерами контрольных расчетов по формулам. Формуляция IAPWS-IF97 разработана в 1997 году. Аббревиатура IF означает, что она предназначена для промышленного использования (I – industrial, F - Formulation). Она включает в себя отдельные формуляции по теплофизическим свойствам воды и водяного пара для пяти областей, показанных на рис. 4: область воды (Region 1), область пара (2), околос критическая область (3), область насыщения (4) и область пара при высокой температуре (5). В правой верхней части рисунка 4 эти области показаны в координатах давление и температура. Левее показана такая же диаграмма, но в координатах «расширяемость»-температура, а ниже в координатах давление-«расширяемость». Квадратиком на диаграммах отмечена тройная точка, а кружочком — критическая точка. Тройная точка как точка только на диаграмме «давление-температура». На двух других диаграммах это не точка, а линия, ограниченная квадратиками. «Идеальность» воды на этих линиях меняется от нуля (вода) до единицы (водяной пар).

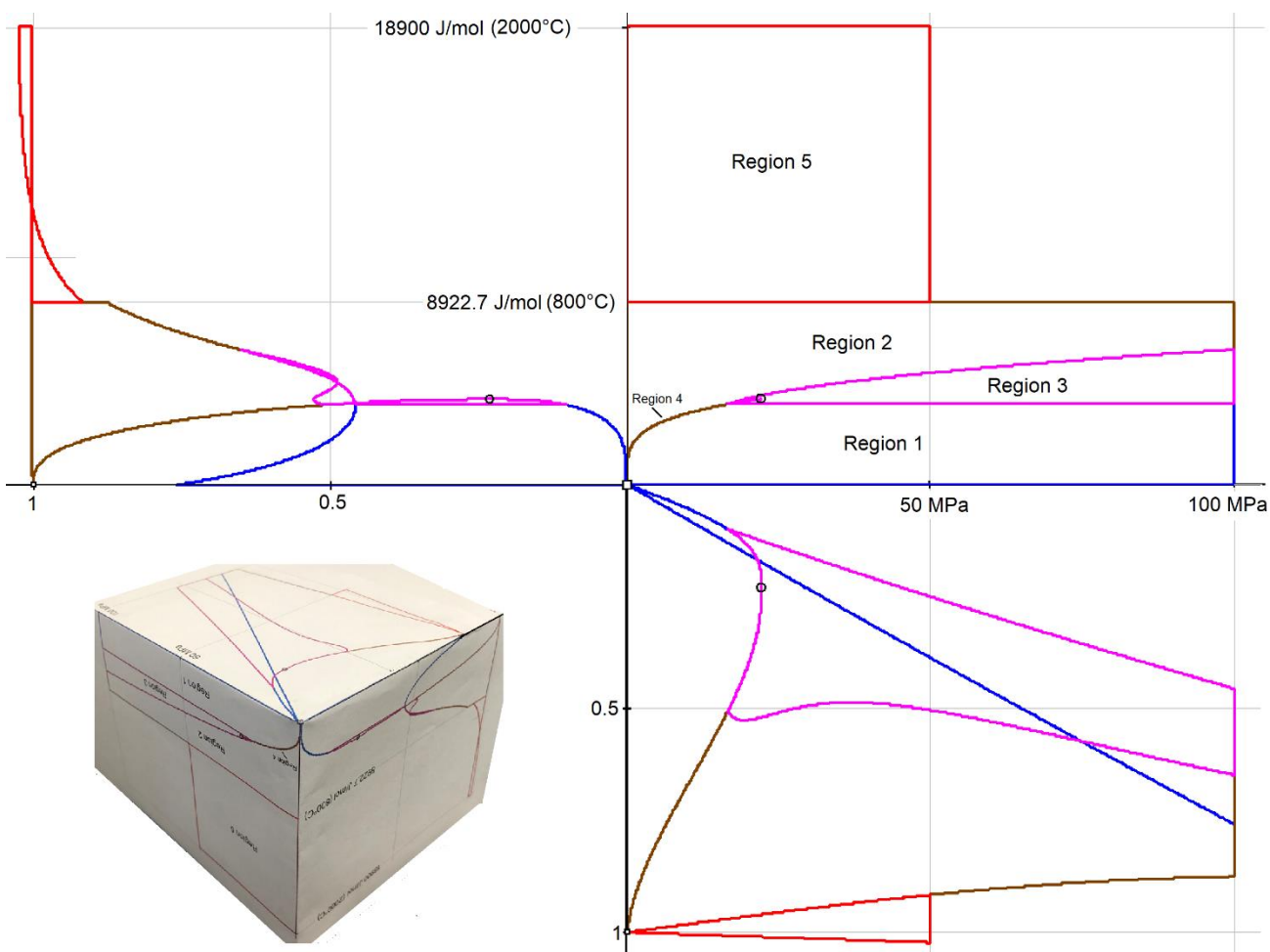


Рис. 4. Коэффициент (фактор) «расширяемости» воды и водяного пара в зависимости от давления и температуры в трех системах координат

Если левую и нижнюю диаграммы на рис. 4 «согнуть» вверх, то получится прямоугольный параллелепипед с красным наростом наверху и с выемками по бокам. На шести гранях этой сложной конструкции будут прорисованы линии, показанные на рис. 4. А что можно будет увидеть внутри

этого прямоугольного параллелепипеда? Здесь понадобится хорошее воображение и/или трехмерная графика компьютера. На ребрах этого прямоугольного параллелепипеда будут отмеряться давление, температура и «расширяемость» воды и водяного пара. Точнее, это будет большой прямоугольный параллелепипед (0–100 МПа, 0–2000°C, 0–1), из которого изъяди маленький прямоугольный параллелепипед (50–100 МПа, 800–2000°C, 0.759–1). Слева внизу рис. 4 вставлена фотография макета такого «термодинамического» прямоугольного параллелепипеда, сделанного из бумаги, где левая грань – это диаграмма с координатами «давление-температура», верхняя грань с координатами «давление-расширяемость» и правая грань с координатами «температура-расширяемость»,

Отметим также, что в области 5 (водяной пар при высокой температуре и низком давлении) коэффициент k (фактор «расширяемости») может быть больше единицы. Это и есть упомянутый нарост на прямоугольном параллелепипеде. Про ханжу часто говорят, что он «святое Папы Римского». Про газ с k больше единицы можно сказать, он «идеальной идеального газа». Плазма или почти плазма это!

Идеально сжимаемый воздух

Авторский пакет WaterSteamPro® позволяет рассчитывать теплофизические свойства не только воды и водяного пара, но и газов. Есть укороченная облачная версия этого пакета [6, 7], работа которой в среде Mathcad 15 показана на рис. 5.

Gas := "Air"

+ Reference: <http://twt.mpei.ru/tthb/Gas.xmcd>

$$p_0 := 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_0 := 18 \text{ }^\circ\text{C} = 2.421 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$s_0 := \text{wspgSGSPT}(\text{Gas}, p_0, T_0)$$

$$p_n := 5 \text{ atm} = 5.066 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$s_n := s_0 \text{ Ideal process of compression}$$

$$T_n := \text{wspgTGSPS}(\text{Gas}, p_n, s_n) = 3.823 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$T_n = 186.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Рис. 5. Расчет процесса сжатия воздуха в камере велосипеда или в компрессоре

В Mathcad-расчете на рис. 5 делается ссылка (Reference) на Mathcad-файл с именем Gas.xmcd, хранящийся в «облаке» по адресу <http://tw.t.mpei.ru/tthb>. После такой ссылки в рабочем документе, показанном на рис. 5, становятся видимыми функции, созданные в документе с именем Gas.xmcd. В частности, будет доступна функция с именем `wspgSGSPT`, которая возвращает значение удельной энтропии газа S со спецификацией GS (у нас это сухой воздух – смесь азота с кислородом) при атмосферном давлении и температуре 18°C (2.421 джоулей на моль газа). Значение удельной энтропии сжимаемого воздуха в расчете не показано по двум причинам. Во-первых, единица измерения этой величины при правильной авторской единице температуры J/mol будет шокировать многих теплотехников своей необычностью. Никаких там градусов Кельвина, кельвинов не будет! А во-вторых, это значение не имеет особого физического смысла, так как оно зависит от принятой точки отсчета этой величины. Главное тут не конкретные значения, а разность конкретных значений. Это как при работе с потенциальной энергией, значение которой зависит от выбранной нулевой высоты. Значение энтальпии газа тоже ничего не значит. Важно знать разность энтальпий в разных точках теплотехнического процесса, для графического отображения которого часто используют диаграмму в координатах «энтальпия – энтропия»¹⁸. Энтальпия растёт – к системе подается энергия, энтропия растёт – процесс несовершенен...

Если воздух сжимать идеально «плавно» (см. сноску 4), то его энтропия не будет изменяться при сжатии. Ещё одна функция пакета WaterSteamPro® – функция с именем `wspgTGSPS`, вернула нам температуру (T) идеально сжатого воздуха при давлении пять атмосфер и удельной энтропии, рассчитанной выше. Результат 3.823 kJ/mol или более всем привычные 186.7°C . Кельвинам тут нет места.

Кстати, постоянная Больцмана в авторском модернизированном Mathcad имеет единицу измерения моль вместо старого всем знакомого джоуля, деленного на кельвин. Это еще один шок у теплотехников. А если принять, что моли — это некие безразмерные штуки, то постоянная Больцмана оказывается совсем безразмерной величиной. Вернее величиной, с размерностью 1 (единица). Это и правильно: настоящие физико-математические константы должны быть безразмерными величинами – число π , число e ...

Упомянем Эйнштейна

Можно также отметить, что формула $ma = kF$, о которой было рассказано в самом начале статьи, не такая уж «странная». Буква k делает эту формулу пригодной и для неклассической (эйнштейновской) механики, где значение k будет зависеть от скорости материальной точки и других параметров. Если скорость низкая, то k равно единице (второй закон Ньютона). Если же скорость приближается к скорости света, то... Кстати, в знаменитую формулу $E = mc^2$ тоже можно вставить некий коэффициент, учитывающий нелинейность нашего мироздания. Кроме того, опираясь на идеи данной статьи, можно букву E (энергия) заменить на букву T (температура). $T = mc^2$ – как вам это понравится!? Или вот такое: $p v = mc^2$.

Формулировку второго закона Ньютона можно дать и в виде $d/dt (m v) = F$ (производная количества движения равна внешней силе). Такая формулировка учитывает эффект изменения массы при изменении скорости. Любопытно, что так формулировал этот закон сам Айзек Ньютон. Отсюда

¹⁸ Эту диаграмму в Германии называют диаграммой Молье. Нам обидно за Дмитрия Менделеева (см. сноску 1), а немцам за Рихарда Молье (Richard Mollier, 1863 — 1935), которого забывают упомянуть при работе с диаграммой «энтальпия-энтропия». Эту очень информативную диаграмму Рихарда Молье предложил использовать в 1903 году.

можно перейти к единой формулировке для ньютоновской и эйнштейновской механики, в которой коэффициент k отвечает только за пересчет единиц измерения: $d/dt (m v) = k F$.

Когда вспоминают Эйнштейна, то приговаривают, что «все в нашей жизни относительно». Коэффициент k , который появился в самом начале статьи, относится к второму закону Ньютона, но его можно трактовать («отнести») иначе, если «отнестись» к другому детищу этого великого ученого – к закону всемирного тяготения. Записать его можно так $F = m_1 \cdot m_2 / r^2$, убрав из него гравитационную постоянную G . В такой ситуации эта константа переместится в уравнение второго закона Ньютона $a \cdot m = G \cdot F$. Все в нашей жизни относительно – относительно и место универсальной газовой постоянной, гравитационной постоянной и других констант в физических законах – в формулах, их описывающих.

Тепломассообмен в велосипедном колесе и насосе

Задача о накачивании велосипедного колеса (рис. 1 и 2) связана скорее с тепломассообменом, а не с термодинамикой¹⁹. Ведь чтобы её решить, нужно более-менее точно рассчитать потери тепла в насосе и в камере колеса во время накачивания — совершения работы, часть которой идет на повышение давление, а часть на выработку тепла. А для этого нужно как минимум знать не только теплопроводность алюминия, резины и воздуха, но и вязкость воздуха, который тут играет две роли: закачивается в камеру велосипеда и служит для наружного охлаждения насоса и колеса. На рисунке 6 показано, как в среде Mathcad вводится значение вязкости воздуха μ_{Air} в рекомендованных SI единицах — паскаль (точнее, микропаскаль²⁰), умноженный на секунду. Затем это значение тут же выводится «на печать» с упрощенной до предела единицей $kg/m \cdot s$. Затем значение μ_{Air} выводится еще раз с введенной пользователем трехуровневой, правильной с точки зрения физики единицей вязкости, где фигурирует ньютон, а не паскаль.

$$\mu Pa := 10^{-6} Pa \quad \text{User pressure unit}$$

$$\mu_{Air} := 18 \mu Pa \cdot s = (1.8 \cdot 10^{-5}) \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$\mu_{Air} = 18 \frac{N \cdot \mu m}{\frac{m}{s} \cdot m^2}$$

Рис. 6. Метаморфозы единицы вязкости

Тут сразу вспоминается такой «литературный» анекдот: «— Кому поставлен этот памятник? — Толстому! — Это тот, кто «Муму» написал? — Нет, «Муму» написал Тургенев! — А почему памятник Толстому?».

¹⁹ Эти две научные дисциплины объединены под «шапкой» теоретические основы теплотехники. И тут непорядок! Давно уже ведутся споры о том, что термодинамику нужно называть термостатикой, а тепломассообмен — термодинамикой. И хорошо бы по примеру механики выделить из них еще одну дисциплину — *термокинетику*. Бог любит троицу! Кстати, о кинематике в теплофизике. Есть динамическая вязкость, а есть эфемерная, вспомогательная вязкость кинематическая. Новые информационные технологии делают ненужной понятие кинематическая вязкость. Вязкость есть вязкость!

²⁰ Обычно к паскалям приписывают приставки (кратные множители) кило, мега, гига... А тут пришлось использовать не множитель, а долю — микро.

Французский математик и физик, но, скорее, литератор и философ Блез Паскаль (1623—1662) вязкостью не занимался. Ей посвятил свои исследования уже упоминавшийся великий математик и физик Исаак Ньютон (1642–1727). Есть даже понятие «ньютоновская жидкость». Физическая версия вышеприведенного анекдота такая: «– В честь кого названа единица вязкости? — В честь Паскаля! — Это тот, кто вязкостью занимался? — Нет, ею занимался Ньютон! — А почему тогда единица вязкости названа в честь Паскаля? — А потому, что такого дурака сваяли разработчики SI!». На рисунке б в единицу вязкости вернули незаслуженно обиженного Ньютона (N), а также единицы длины (m , точнее, микрометр), скорости (m/s) и площади (m^2). Такая сложная единица измерения получилась потому, что сила вязкого трения (N), действующая на ньютоновскую жидкость или газ, пропорциональна скорости относительного движения тел (m/s) и площади движущихся плоскостей (m^2) и обратно пропорциональна расстоянию между плоскостями (m). В ручных расчетах, конечно, никто не будет использовать такую «трехэтажную» единицу вязкости, но в компьютерных расчетах она будет смотреться вполне естественно. Тем более для образовательных и самообразовательных целей. Но можно просто оставить то, что автоматически возвращает пакет Mathcad — упрощенное до предела выражение $kg/m/s$. Как говорится — ни нашим, ни вашим. А паскалями пусть измеряют давление. Что, кстати и неудобно — приходится часто использовать множители кило, мега и даже гига или полулегальные единицы — атмосферы физические как в задаче о велосипедном колесе (рис. 2 и 5). В примере на рис. 6 использовалась совсем уж нереальная единица давления микропаскаль как множитель в единице вязкости.

Если взять две пластины площадью один квадратный метр каждая, сделать зазор между ними, равным одному микрону, поместить в зазор воздух и перемещать пластины со скоростью один метр в секунду, то нужно будет приложить силу, равную 18 ньютонам.

Не все в порядке и с другим транспортным свойством, использующимся в теплообмене, — с теплопроводностью. Во-первых, в России по крайней мере так до конца и не договорились, как называть её численные значения — просто «теплопроводность» или «коэффициент» теплопроводности». Во вторых и главных, в единице измерения теплопроводности (или коэффициента теплопроводности) упорно сокращают метры — пишут $W/(m K)$. А нужно писать $W m/(m^2 K)$ с учетом, что тут присутствует и энергия (W), и площадь, через которую она передается (m^2), градиент температуры (m и K ; закон теплопроводности Фурье). Но сокращать — так сокращать, упрощать, так упрощать: $W m/(m^2 K) = W/(m K) = kg m/(s^3 K)$. А если еще кельвины заменить на наши джоули, деленные на моли, то получится совершенно «неудобоваримая» единица теплопроводности $mol/(m s)$. Да, именно такие единицы будет по умолчанию приписывать «правильный» Mathcad численному значению теплопроводности при выводе его «на печать». Но, повторяем, пользователь вправе заменить эту «экзотику» на привычные ватты, деленные на метры и кельвины.

В США с теплопроводностью случилась другая «засада». В американских справочниках к единице теплопроводности приписывают не положенный градус Ренкина, а градус Фаренгейта. Но в единице теплоемкости и энтропии стоит «правильный» градус Ренкина (американский аналог кельвина). Когда автор спросил своих коллег из Национального института стандартов и технологий (NIST, США; они выпускают подобные справочники), почему тут такая путаница, то они ответили, что скорее можно поменять конституцию США, чем приучить американских инженеров иметь градусы Ренкина вместо градусов Фаренгейта

в единице теплопроводности. Тогда автор порекомендовал американским коллегам для однообразия поменять градусы Ренкина на градусы Фаренгейта в теплоемкости, в энтропии, в злополучной (см. эту статью) универсальной газовой постоянной. Автору ответили, что это будет совсем уж «экзотичненько». У нас в единице теплопроводности тоже раньше писали градусы Цельсия, равные кельвину, но потом перешли на кельвины. Автор сначала написал «на правильные кельвины», но потом вспомнил о теме этой статьи и вымарал слово «правильные».

А вот один парадокс тепломассообмена и термодинамики, который можно назвать гомеопатическим.

Если мы хотим немного остудить чай в чашке, мы его помешиваем ложечкой. Но этим мы добавляем в чай механическую энергию, которая переходит в тепловую. Температура чая должна повыситься, но она понижается. Почему? А потому, что мы через вихри на поверхности чая и через увеличение скорости чая у внутренней поверхности чашки улучшаем теплообмен с окружающей средой, что приводит к более быстрому остыванию чая. Сразу вспоминается... гомеопатия – сомнительное направление в медицине с её девизом «Лечим подобное подобным!». Если же слишком горячий чай налить в блюдечко и подуть на него (вспомним картину Кустодиева «Чаепитие в Мытищах») то это будет уже не гомеопатия, а аллопатия – традиционные методы лечения больного.

Кстати, о единицах удельных (массовых) теплоемкости, внутренней энергии, энтальпии, энтропии. Во всех справочника там присутствуют килоджоули, деленные на килограммы, которые пакет Mathcad упорно сокращает до квадратных метров, деленных на квадратные секунды (m^2/s^2 – кинематическая энтальпия?). А это, как в случае с «паскалевской» вязкостью (см. выше), лишает ответ всякого физического смысла. Приходится возвращать привычные, «физичные» («динамичные») килоджоули, деленные на килограмм kJ/kg . Но и тут приходится удивляться — а почему бы не писать и говорить проще и короче — джоули, деленные на грамм (J/g), сократив балластные кило (гибрид SI и CGS).

Еще большая «экзотичность» появится в термодинамических потенциалах, коих, как известно, четыре: внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия Гельмгольца и потенциал Гиббса (системы с постоянным числом частиц). Попробуйте в формулировке некоторых из них и в выражениях для их конвертации заменить произведение $p v$ на просто T без учета универсальной газовой постоянной (см. название статьи)!

Выводы

Это статья не о термодинамике, а о новых информационных технологиях, конкретнее, о современных инструментах компьютерных расчетов с использованием единиц измерения. Вернее так – и о термодинамике, и об информатике — о термодинамической информатике с примесью теории размерности, если так можно выразиться. Увы, нет для такой статьи подходящего журнала. Поэтому-то она вряд ли будет опубликована. Для академического журнала она не годится еще и потому, статья написана в «неакадемическом стиле» и что в ней фигурируют анекдоты. Добавим ещё один, переделанный из старого еврейского в духе этой статьи.

К профессору домой приходят два студента и просят его разрешить их спор. Один студент утверждает, что уравнение идеального газа – это $p v = RT$, а другой – что это $p v = T$. Профессор

выслушал доводы студентов и сказал, что они оба правы. Но тут из кухни раздался голос жены профессора: «Не может так быть, что они оба правы!». Профессор вздохнул и сказал, что она тоже права.

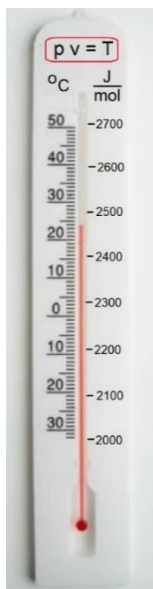
В статье было сказано, что переименование градусов Кельвина в кельвины – это заметание сора под ковер. В наши дни появился «мощный пылесос» с элементами искусственного интеллекта под названием компьютерные средства работы с физическими величинами и их единицами измерения [1]. Этот «пылесос» легко может убрать оставшийся сор в физико-метрологическом доме. Но умные люди говорят, что в кабинете ученого после идеальной уборки становится невозможно работать. Все вещи, книги, рабочие записи и прочее находятся на «правильных» местах, а не там, где их бросили в процессе творческой работы. Идеально убраным может быть только мемориальный кабинет в доме-музее давно умершего ученого.

Так давайте же оставим в физике, термодинамике, метрологии всё как есть. Но при этом будем понимать, что там не все в идеальном порядке, который не только не нужен, но и вреден.

Давайте также переименуем Маяковского в духе конца второго абзаца сноски 1 и скажем так.

Мы говорим Кельвин – подразумеваем абсолютную термодинамическую температуру! Мы говорим абсолютная термодинамическая температура – подразумеваем Кельвина! Но оказывается, что эта температура никакая не термодинамическая (см. эту статью). И даже не абсолютная, если учесть то, что уже после трудов Кельвина появились доказательства существованию отрицательной абсолютной температуры. Но это уже особый разговор.

Послесловие с картинкой



Представьте себе, что вы выглядываете из дому на улицу, и видите на наружной стороне окна такой «идеальный» уличный термометр — рис. 7.

Рис. 7. Уличный термометр с двумя шкалами: с привычной и правильной.

В США много подобных термометров с одной шкалой для «аборигенов», привыкших к температурной шкале Фаренгейта, и с другой для приезжих со Старого Света, воспринимающих только градусы Цельсия. Наш же термометр на рис. 7 предназначен для неких «температурных ортодоксов», к коим относит себя и автор. Эти «правверные» работают только с правильными единицами температуры, но допускают и вспомогательные. Это могут быть градусы Цельсия (рис. 7) или градусы Фаренгейта для Нового Света. Градусы Кельвина, пардон, кельвины и градусы Ренкина здесь не только практически, но и теоретически никому не нужны.

Единице температуры kJ/mol автор предлагает дать сокращенное обозначение латинской заглавной буквой P. Вода при атмосферном давлении замерзает при температуре 2.271 P, а кипит при 3.103 P. Почему здесь выбрана буква P? Это тайна, в которую посвящен только автор статьи.

Авторская литература:

1. Очков В.Ф. Физические и экономические величины в Mathcad и Maple. М.: Финансы и статистика. 2002 (http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forword_book.htm)
2. Теплотехнические расчеты на компьютере / Александров А. А., Аунг Ту Ра Тун, Гаряев А. Б. [и др.] — М.: Издательство МЭИ, 2019. — 447 с.: цв. ил. (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Therm-Studies.pdf>)
3. Очков В. Ф., Орлов К. А. Градусы в физических величинах компьютерных вычислений // Мир измерений. № 3–4, 2020 (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Degrees.pdf>)

4. Очков В.Ф., Гуличева Е. Г., Очкова Н. А. Лев Толстой и математика // Филология и культура № 2(64). С. 135–143 (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Ellipse-Tolstoy.pdf>)
5. Александров А. А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики / А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф. Очков. — 2-е изд., перераб. и допол. — М.: Издательский дом МЭИ. 2017. — 226 [8] с.: ил. (<http://www.twt.mpei.ru/rbtp>)
6. Очков В.Ф., Орлов К. А., Чжо Ко Ко. "Облачные" функции и шаблоны инженерных расчетов для АЭС // Теплоэнергетика. № 10. 2014 г. С. 68–72 (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Thermal-Eng-10-2014-rus.pdf> и <http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Thermal-Eng-10-2014.pdf>)
7. Очков В.Ф., Орлов К. А. Единицы измерений в трех видах формул: в физических, эмпирических и... псевдоэмпирических // Мир измерений № 1–2, 2021 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Pseudo.pdf>)