

$$p v = T$$

д.т.н., профессор Очков В. Ф.

к.т.н., доцент Орлов К. А.

НИУ «МЭИ»

Кафедра теоретический основ теплотехники

«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»

В статье обсуждается новая технология работы с температурой при компьютерных расчетах в средах физико-математических программ. Затрагиваются фундаментальные вопросы физики, связанные с системами физических величин и единиц их измерения. Температура рассматривается не как основная, а как производная физическая величина.

Ключевые слова: температура, закон идеального газа, универсальная газовая постоянная, второй закон Ньютона, физико-математические компьютерные пакеты.

The article discusses a new technology for working with temperature in computer calculations in the environment of physical and mathematical programs. The fundamental questions of physics related to systems of physical quantities and units of their measurement are touched upon. Temperature is considered not as the main, but as a derivative physical quantity.

Key words: temperature, ideal gas law, universal gas constant, Newton's second law, physical and mathematical computer packages.

Название статьи вдвойне необычно. Во-первых, оно состоит только из крайне короткой математической 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 не упоминают. Такая же примерно история случилась и с периодической таблицей химических элементов, которая является именной только в России (таблица Менделеева). До Менделеева уравнение идеального газа было свое для каждого конкретного газа. Менделеев объединил их, введя в уравнение еще одну величину – молярную массу газа. Немцы в вопрос об уравнении идеального газа вспоминают своего Клаузиуса (Rudolf Julius Emanuel Clausius; 1822 —1888). В этом деле много конъектуры и политики. Как, впрочем, и в международной системе физических величин, которая будет затронута в статье.

Представьте себе, что вы открываете учебник физики и видите там такую формулу $m a = k F$ 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, бы удивились и сказали, что в этой формуле не должно быть никакой константы k . Но вам бы возразили в том плане, что постоянная k служит для того, чтобы перевести силу, выраженную в килограммах-силы в ньютоны. И пояснили, что люди уже давно привыкли выражать силу в килограммах-силы, а не в каких-то там непонятных ньютонах². 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 второго закона Ньютона $m a = k F$.

Но если мы откроем учебник по классической термодинамике – одного из разделов физики, то мы наяву увидим уже упомянутую подобную «обремененную» константой формула $p v = R T$ с пояснением того, что p – это давление (pressure), v – удельный молярный объем (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. В какие? Читаем статью дальше. Часто в этой формуле можно увидеть и еще одну переменную n с пояснением того, что это молярная масса идеального газа.

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 велосипеда. Спрашивается, сколько качков поршневым насосом нужно сделать, чтобы поднять давление в шине от одной до пяти атмосфер. На рисунке 1 показана схема задачи, а на рисунке 2 её решение в среде *модернизированной авторами* (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: крышка достаточно жесткая – процесс в камере изохорный. 2. Температура воздуха в

«Предшественниками» уравнения идеального газа были законы Гей-Люссака и Бойля-Мариотта. Учительница физики автора статьи повторяла своим ученикам: «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)».

² В школьные годы автор с друзьями прикалывался в магазине – просил продавщицу отвесить 1000 ньютонов колбасы. Ведь, вес, как учили в школе на уроках физики, это сила, а силу измеряют ньютонами, а не граммами и килограммами, как массу.

камере и насосе почти не меняется. Воздух за счет теплообмена с окружающей средой успевает при каждом качке насоса охладиться до температуры, близкой к температуре окружающей среды (процесс почти изотермический). Для этого необходимо накачивать колесо велосипеда медленно, плавно. 3. Нет утечки воздуха из насоса.

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

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 миллилитра³). 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]. Далее в расчет вводятся давление p_0 и температура T_0 окружающей среды. 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 Цельсия) 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 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 расчет температуры. Теперь это не физическая константа, а просто переводной коэффициент работы с единицами температуры. Но это не только некий чисто компьютерный прием – это восстановление физической справедливости, если так можно выразиться. Об этом будет сказано ниже.

³ 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.

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

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

$$p_0 := 1 \text{ atm} = (1.013 \cdot 10^5) \text{ Pa}$$

$$T_0 := 18 \text{ }^\circ\text{C} = (2.421 \cdot 10^3) \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$p_0 \cdot \frac{V_o}{x_0} = T_0$$

$$x_o := p_0 \cdot \frac{V_o}{T_0} = 0.271 \text{ mol}$$

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

$$p_0 \cdot \frac{V_{\text{pump}}}{x_{\text{pump}}} = R \cdot T_0$$

$$x_{\text{pump}} := p_0 \cdot \frac{V_{\text{pump}}}{T_0} = 0.012 \text{ mol}$$

$$n := 88$$

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

$$p_n \cdot \frac{V_o}{x_o + n \cdot x_{\text{pump}}} = T_0 + \Delta T$$

$$p_n := \frac{T_0 + \Delta T}{\frac{V_o}{x_o + n \cdot x_{\text{pump}}}} = 5.008 \text{ atm}$$

Рис. 2. Расчет процесса накачивания колеса велосипеда

После ввода исходных данных рассчитывается начальное количество воздуха в камере велосипедного колеса x_o в молях⁴. 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 «правильное» 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 Цельсия, но объем камеры велосипеда не изменился – изменился удельный молярный объем, объем, деленный на количество воздуха (в молях). И нигде в расчетах 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 кельвинов в джоули, деленные на моль. Отметим и такой нюанс – переменная R у нас освободилась для хранения радиуса колеса велосипеда⁵.

⁴ 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.

⁵ 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

Но вернемся к физике задачи.

В физике температура определяется средней кинетической *энергией* хаотического движения молекул, приходящейся на одну степень свободы системы, грубо говоря, на одну молекулу. Теорема о равнораспределении говорит, что эта средняя кинетическая энергия молекул будет совершенно одинакова для любых молекул с одинаковым числом степеней свободы, даже если они будут иметь разные массы. Так что у кипящей воды и её пара эти средние энергии одинаковы. И этот результат справедлив в общем случае, а не только для идеальных газов. Все эти результаты получены в рамках статистической механики. В термодинамике, конкретнее, в технической термодинамике эти результаты получить нельзя. Термодинамика не знает ни молекул, ни атомов. Она является феноменологической теорией, работающей со сплошными средами.

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. Пакет Mathcad, повторяем, по умолчанию работает с SI, где семь базовых единиц измерения⁶, включая и температуру (кельвин – kelvin⁷), 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.

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 значительно позже, спустя целый век (1834 – 1874, Максвелл, Больцман, Клапейрон, Клаузиус, Менделеев и др.) было выведено теоретическое уравнение состояния идеального газа с температурой, которое и пришлось подгонять под «градусы». 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 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, о которой мы скажем ниже), градусы жесткости воды, алкогольные градусы и др. Да, градус Кельвина переименовали в кельвин. Но это похоже на то, как в «метрологическом доме» не провели капитальную уборку, а просто... замели мусор под ковер. Кстати, градус Ренкина (заокеанский аналог градуса Кельвина, кельвина) так и остался градусом Ренкина: ренкинов (единиц температуры) в метрологии нет и не предвидится. И еще про градусы температуры. Теплотехники говорят – в котле 200 градусов Цельсия. Но градус Цельсия равен градусу Кельвина (кельвину), а градус Фаренгейта равен градусу Ренкина. Следовательно, в котле 200

универсальной газовой постоянной, и градусов Ренкина. Внешне они по умолчанию отличаются цветом – константа зеленая, а единица физической величины – синяя.

⁶ 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?

⁷ 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 измерения, пардон, единиц физических величин, названных в честь знаменитых ученых. Крайне почетно также если фамилию сократят до одной-двух букв: не Кельвин, а *K*, не Паскаль, а *Pa*, не дедушка, а *де*, не бабушка, а *ба* (шутка)!

кельвинов (???). Мы к такой условности, к такому умолчанию привыкли. Но по-хорошему следует педантично (занудно) говорить, что в котле 200 градусов по шкале Цельсия (см. также сноску 9 про микрограммы).

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.) позволяет вернуть в расчеты некое подобие истинной термодинамики 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). Джоуль, напомним, первым нашел эквивалент между механической (электрической – см. эпиграф статьи) работой и тепловой энергией. Этот факт даже зафиксирован на надгробной доске Джоуля в Вестминстерском аббатстве⁸.

В системе единиц физических величин SI, откровенно говоря, царит полный бардак. Про незаслуженно возведенный в степень основной единицы кельвин мы уже написали. Основная единица массы оказалась с кратным множителем кило⁹. Моли – это просто шутики, такие, как «десяток», «дюжина», «сотня». Вылезла какая-то непонятная эмпирическая кандела, но остались за бортом единицы стоимости, количества информации... Единицы времени так и остались недесятичными. Малоизвестных, почти забытых физиков «наградил» именными единицами измерения, а заслуженных корифеев обошли. И т.д. и т.п. Ровно семь основных физических величин (пространство, масса, время, сила тока, количество вещества, сила света и наша температура) – это не какая-то «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 библиографических ссылок в этой статье и т.д. В этот ряд разработчики SI приписали и семь основных физических величин.

«Полный бардак» – это, конечно, авторы погорячились. Исправимся и скажем, что система единиц физических величин SI компромиссна и крайне несовершенна. Но несовершенен и наш мир! В связи с этим вспоминается старый анекдот про то, как один клиент долго ждал своих заказанных брюк и упрекнул портного, сказав, 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!».

Если говорить не об идеальном газе, а о реальных веществах – газах и жидкостях, то для описания их свойств можно вернуть четвертую переменную в уравнения 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 называют коэффициентом (фактором)

⁸ В калории (тепло) примерно 4.19 джоуля (работа – ньютон, умноженный на метр). Автор предлагает 19 апреля каждого года праздновать День теплотехника. По образцу Дня математика, какой отмечают 14 марта (примерно 3.14).

⁹ 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 шутовую 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.

сжимаемости. В этом смысле коэффициент k можно назвать коэффициентом (фактором) «расширяемости». 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 сертифицированной программы WaterSteamPro® (www.wsp.ru), которая базируется на формуляциях Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (www.iapws.ru), в которой работают авторы этой статьи. Расцветка графика сделана по схеме радуги: красный цвет – это значения коэффициента k , близкие к единице (идеальный газ – водяной пар с низким давлением и высокой температурой), фиолетовый цвет – это значения 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 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 или плотность, то мы получим так называемую *термодинамическую поверхность воды и водяного пара*, где будут четко видны и поверхность насыщения, и линия тройной точки. С этой поверхностью можно поработать в среде авторского он-лайн расчета [4, 6, 7] по адресу <http://twm.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.

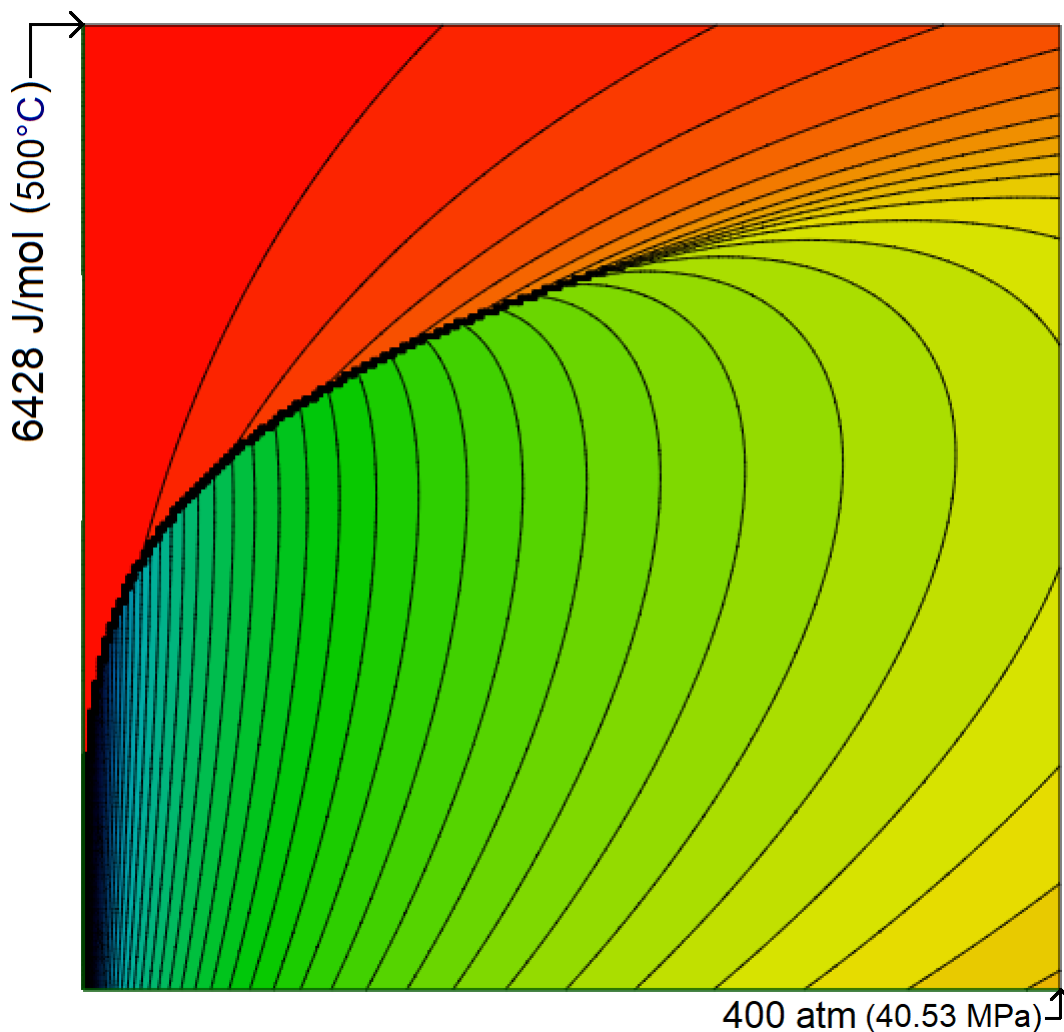


Рис. 3. «Расширяемость» воды и водяного пара в зависимости от давления и температуры

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.

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 все делать достаточно плавно (вспомним знаменитого режиссёра и его податливых дам в сноске 4), то нестабильных термодинамических проблем не будет. Не будет и нового инфаркта у режиссёра и физика!

Пакет программ WaterSteamPro® позволяет рассчитывать теплофизические свойства не только воды и водяного пара, но и газов. Есть укороченная облачная версия этого пакета [5-7], работа которой в среде Mathcad 15 показана на рис. 4.

☞ Reference: <http://tw.t.mpei.ru/tthb/gas.xmcd>

$$\text{Gas} := \text{"Air"} \quad p_0 := 1 \text{ atm} \quad T_0 := 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$s_0 := \text{wspgSGSPT}(\text{Gas}, p_0, T_0) = 6837.0 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$p_n := 5 \text{ atm} \quad s_n := s_0 \quad \text{Ideal process}$$

$$T_n := \text{wspgTGSPS}(\text{Gas}, p_n, s_n) = 186.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$s_n := 1.01 \cdot s_0 \quad \text{Not Ideal process}$$

$$T_n := \text{wspgTGSPS}(\text{Gas}, p_n, s_n) = 218.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Рис. 4. Расчет процесса сжатия воздуха в камере велосипеда

В Mathcad-расчете на рис. 4 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. 4, становятся видимыми функции, созданные в документе с именем gas.xmcd. В частности, будет доступна функция с именем wspgSGSPT, которая возвращает значение удельной массовой энтропии газа со спецификацией Gas (у нас это воздух, смесь азота с кислородом) при атмосферном давлении и нормальной температуре 18°C. Если воздух сжимать идеально «плавно», адиабатно, то его энтропия не будет изменяться при сжатии. Вторая функция пакета WaterSteamPro®, функция с именем wspgTGSPS, вернула нам температуру идеально сжатого воздуха при давлении пять атмосфер: 2420.8 J/mol или 186.7°C. Если же будут десятипроцентные потери на трение, то температура будет выше: 4087 J/mol или 218.4°C.

Мы тут упомянули энтропию, вернее, удельную массовую энтропию с единицей J/kg/K. Но это единица физической величины, которую подправил сам пользователь пакета – см. вторую строку на рис. 4. По умолчанию, связанному с тем, что температура измеряется не в кельвинах, а в джоулях, деленных на моли, была выведена единица mol/kg, которую пользователь заменил на традиционные джоули, деленные на килограмм и на кельвин.

Кстати, постоянная Больцмана в авторском модернизированном Mathcad имеет единицу измерения моль вместо старого всем знакомого джоуля, деленного на кельвин. А если принять, что моли – это некие безразмерные штуки, то постоянная Больцмана оказывается совсем безразмерной величиной. Вернее величиной, с размерностью 1 (единица).

Можно также отметить, что формула $m a = k F$, 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 $E = m c^2$ тоже можно вставить некий коэффициент, учитывающий нелинейность нашего мироздания.

И ещё.

Задача о накачивании велосипедного колеса (рис. 1 и 2) связана скорее с тепломассообменом, а не с термодинамикой¹⁰. Ведь чтобы её решить, нужно более-менее точно рассчитать потери тепла в насосе и в камере колеса. А для этого нужно как минимум знать не только теплопроводность алюминия, резины и воздуха, но и вязкость воздуха, который и закачивается в камеру велосипеда, и служит для наружного охлаждения насоса и колеса. На рисунке 5 показано, как в среде Mathcad вводится значение вязкости воздуха μ_{Air} в рекомендованных SI единицах – паскалях (микродинамик), умноженные на секунды. 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 трехуровневой, правильной с точки зрения физики единицей вязкости.

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

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

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

Рис. 5. 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 тогда памятник Толстому?».

Французский математик и физик, но, скорее, литератор и философ Блез Паскаль (1623—1662) вязкостью не занимался. Ей посвятил свои исследования великий математик и физик Исаак Ньютон (1642–1727). Есть даже понятие «ньютонская 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 6 в единицу вязкости вернули незаслуженно обиженного Ньютона (N), а также единицы длины (m), скорости (m/s) и площади (m^2). Такая сложная единица измерения получилась потому, что сила вязкого трения (N), действующая на ньютонскую жидкость или газ, пропорциональна скорости относительного движения тел

¹⁰ Эти две научные дисциплины объединены под «шапкой» теоретические основы теплотехники. И тут не порядок! 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!

(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 4). В примере на рис. 5 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.

Кстати, о единицах удельных 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). А это, как в случае с вязкостью, напрочь лишает ответ какого-либо физического смысла. Приходится возвращать привычные и «физичные» килоджоули, деленные на килограмм kJ/kg . Но и тут приходится удивляться – а почему бы не писать и говорить проще – джоули, деленные на грамм (J/g), сократив балластные кило.

Послесловие.

Представьте себе, что вы выглядываете из дому на улицу, и замечаете на наружной стороне окна такой «идеальный» уличный термометр – рис. 6.

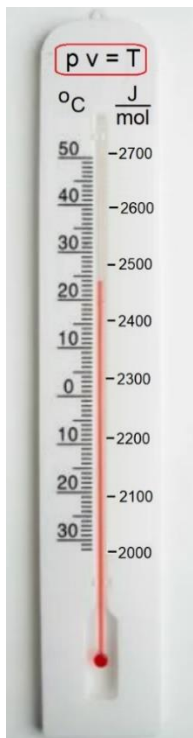


Рис. 6. Уличный термометр с двумя шкалами: с привычной и правильной.

В США много подобных термометров с одной (левой) шкалой для «аборигенов», привыкших к шкале Фаренгейта, и с другой (правый) для приезжих со Старого Света, воспринимающих только градусы Цельсия. Наш же термометр на рис. 6 предназначен для неких «температурных ортодоксов», к коим в какой-то мере относят себя и авторы. Они работают только с правильными единицами температуры, но допускают и вспомогательные. Это могут быть или градусы Цельсия (рис. 6) или градусы Фаренгейта для Нового Света. Градусы Кельвина, пардон, кельвины здесь практически никому не нужны.

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. В. Ф. Очков, К. А. Орлов. Градусы в физических величинах компьютерных вычислений // Мир измерений. № 3–4, 2020 (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Degrees.pdf>)
4. 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>)
5. 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>)
6. Valery Ochkov, Konstantin Orlov, Volodymyr Voloshchuk. Thermal Engineering Studies with Excel, Mathcad and Internet. Springer, 2016 (<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-26674-9>)
7. Инженерные расчеты. Книга-билингва: учебное пособие для вузов / В. Ф. Очков, К. А. Орлов, А. И. Тихонов [и др.]. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022 ()