

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОЭЛЕКТРОТЕХНИКИ или размышления у мемориальных досок

Доктор технических наук, профессор,
заслуженный энергетик Российской Федерации **В.Ф. ОЧКОВ**
(НИУ “МЭИ”)

В этих не совсем толерантных заметках автор рассуждает о судьбах отечественной академической науки вообще и о несовершенстве систем измерения электрических и тепловых величин в частности. Показано, что современные компьютерные инструменты и элементы искусственного интеллекта могут существенно исправить сложившуюся здесь не совсем нормальную ситуацию.

*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
так чувствуется инстинктом...*

Лев Толстой “Анна Каренина”

В Московском энергетическом институте есть две базовые кафедры – кафедра теоретических основ электротехники (ТОЭ) и кафедра теоретических основ теплотехники (ТОТ), на которой работает автор этих строк. По большому счёту базовые кафедры любого технического вуза (втуза) – это кафедры

математики и физики, но они есть в любом высшем техническом учебном заведении. И только вуз энергетического профиля обязательно должен иметь кафедры ТОЭ и ТОТ. Мировая энергетика – это в основном процесс преобразования тепловой энергии, полученной за счёт сжигания топлива, в электрическую.

В вышеприведенном абзаце можно и нужно слово *вуз* заменить на слово *университет*. Но...

В достопамятные перестроечные годы автор на одной из улиц Москвы поймал машину. За рулем оказался молодой паренёк¹. В пути разговорились. Водитель поведал, что он учится в МГУ-с. Автор сразу зауважал его (учится в престижном вузе и вдобавок работает!) и попросил уточнить факультет. Водитель ответил, что у них нет факультетов. Автор удивился – как так в МГУ нет факультетов!? Водитель ответил, что он учится не в МГУ, а в МГУС – в Московском государственном университете сервиса. Автор чуть не выпал из машины: тогда эпидемия переименования вузов только-только началась. Слово МГУС было воспринято, как иронично-вежливое “да-с, МГУ-с”. Автор вспомнил таксистов в Америке: “*yes sir, MIT sir*”.

Переименование большинства учебных заведений в университеты – это своеобразная дискредитация нашей системы высшего образования. Теперь у нас увы, в основном, не университеты, а, как выражаются некоторые студенты, универы. Есть даже такой пошлый телесериал. Университетами язык не поворачивается их называть! Поэтому-то можно предположить, что ВШЭ назвала себя высшей школой экономики, а не университетом экономики. Хорошие пединституты в наших областных центрах стали плохими или средненькими университетами.

¹ Бомбилами их называли в те времена. Сейчас их вытеснили разного рода агрегаторы такси. Потыкал пальцем в смартфон, и через пару минут вам подадут машину.

Было единственное и уникальное МВТУ – теперь это технический университет имени неизвестно кого – какого-то недоучившегося ветеринара, глупо погибшего недалеко от этого Императорского Московского технического училища (ИМТУ).

От Московского энергетического института осталась лишь... трамвайная остановка: в официальном названии родного вуза автора теперь нет слов “Московский энергетический институт”, а есть только аббревиатура НИУ “МЭИ”, которую можно расшифровывать как угодно. И лишь наличие базовых кафедр ТЭЭ и ТОТ (см. начало статьи) говорит о том, что это именно энергетический институт, а не экономический, экологический, эстетический, этнографический, энтомологический, экуменический...

Сейчас, кстати, наступило такое время, когда можно не только отказать от пресловутой Болонской системы, катком проехавшей по нашему высшему образованию², но и вернуть вузам их исторические названия. Но увы, джина уже не загнать назад в бутылку...

У входа в корпус МЭИ, где расположена кафедра ТЭЭ, висит мемориальная доска – см. рис. 1.

Про этого профессора рассказывают такую байку. Сдает ему студент второго курса экзамен по теоретическим основам электротехники. Карл Адольфович прерывает студента и ласково говорит ему: “Вы, батенька, закона Ома не знаете!

² Проехалась, конечно, не система, а люди, которые решали свои задачи и делают это до сих пор. Ещё один пример – так называемая цифровая кафедра.

Ну-ка, посмотрим, что у вас стоит по физике?” Профессор перелистывает зачётку студента на странице первого курса второго семестра, видит там тройку по физике, зачеркивает её и говорит обалдевшему студенту: “Вы, мой любезный, сначала физику изучите и сдайте раздел про электричество, а потом уж приступайте к освоению моего предмета!” Деканат в шоке и пытается как-то исправить эту экстраординарную ситуацию. Профессору же такие выходы с рук – уж очень он был авторитетен: был сподвижником Кржижановского – вместе разрабатывали план ГОЭРЛО. Современные электронные зачётки введены в МЭИ и для того, чтобы исключить такие эксцессы. В них можно ставить оценки только по своему проведённому экзамену. А о законе Ома мы ещё поговорим.

История о профессоре Круге и законе Ома старая и всем известная. Она даже в Википедию попала – в статью о профессоре Круге. Но у неё есть современное поучительное продолжение.

Рекомендуется на должность заведующего кафедрой теоретических основ электротехники – не этой, а другой – сравнительно молодой человек. Этот кандидат (и наук, и на должность) на заседании кафедры в своей иннаугурационной речи честно признается, что он не очень силен в профильной дисциплине кафедры, что он больше практик, чем теоретик, но через свои связи поможет кафедре в материальном отношении – принесёт договоры на кафедру, повысит зарплату сотрудникам, выбьет новое оборудование

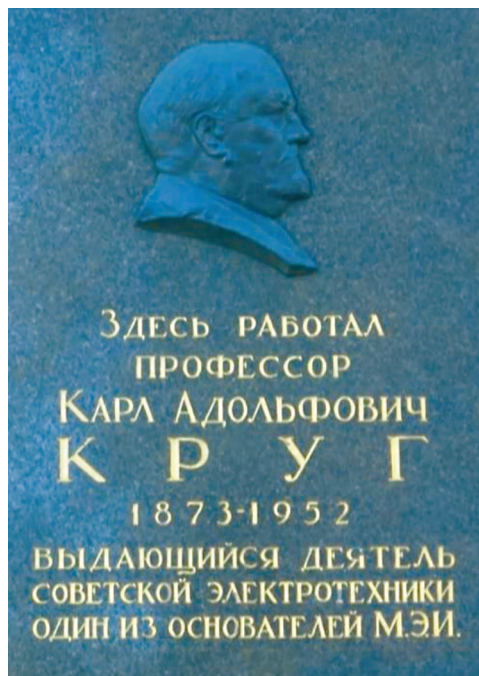


Рис. 1. Памятная доска профессора К.А. Круга

и прочее. И что он со временем нахватается нужных знаний. По традиции считается, что заведующий кафедрой должен быть если не корифеем, то неким авторитетом в науке, связанной с кафедрой. Так вот, на описываемом заседании кафедры один заслуженный профессор геройски встал и сказал этому кандидату примерно так: “Молодой человек, а вы заведовали кафедрой физики? Пока ещё нет?! Тогда вы сначала поруководите физиками, а уж потом приходите командовать нами и заодно набираться нужных знаний!”

Да, наш кандидат честно раскрыл свои карты: садится не в свои “научные” сани, но признаётся в этом. И чётко сказал, что он скорее не учёный, а *менеджер научных*

и образовательных проектов. Подавляющее же большинство подобных кандидатов не так честны, и о многом умалчивают.

Кто-то сочтёт, что это явление только нашего постсоветского времени, когда специалистов на производстве, в науке и в образовании стали теснить “эффективные менеджеры”. Но это не так и ситуация довольно точно описывается анекдотом, переделанным из старого актёрского. Человек умирает и попадает на небеса, где его встречает апостол Пётр, который справляется на компьютере о вновь прибывшем и отправляет его в ад. На удивлённый вопрос новопредставленного апостол отвечает, что вы, мол, проработавший всю жизнь научным сотрудником, не “менеджером научных проектов”, маскирующимся под учёного, а настоящим учёным. Вон, какой у вас высокий индекс Хирша по статьям, где вы либо один, либо главный, настоящий автор. И даже какая-то там зависимость в честь вас названа... А учёные в Бога не веруют, собак режут и т.д. и т.п. Им прямая дорога в ад.

Делать нечего – побрёл наш ученый вдоль ограды рая в ад. Но сквозь решётку забора он видит двух своих бывших начальников из родного НИИ – завлаба (члена-корреспондента) и самого директора (академика). Наш герой бежит назад и говорит апостолу Петру: “Как вы учёных в рай не пускаете!? А вон, кто это там сидит?!” Апостол всполошился, глянул на сидящих в раю и успокоил нашего бедолагу: “Да какие это учёные!?”

Сейчас, читая в той же Википедии о директорах научных институтов, о ректорах вузов – о членах-корреспондентах и академиках, увешенных наградами и научными званиями, отмеченных научными премиями, трудно понять, кем они были – по-настоящему учёными или просто “топ-менеджерами от науки”, успешно занимавшимися по совместительству, как когда-то говорили, “академической греблей под себя”. Только гениальные люди могли совмещать большую науку с большой административной работой. А таких людей по пальцам можно перечесть! Обычно “большие начальники” пишут свои диссертации, монографии и научные статьи двумя способами – либо они забрасывают свою основную работу, переключая всё на своих замов, либо поручают написание статей, диссертаций и монографий своим подчинённым или зависимым людям на стороне. Исключения, повторяем, очень редки. С другой стороны, многие топ-менеджеры научных проектов, главы институтов и университетов вполне искренне полагают, что заниматься научной или педагогической работой “каждый дурак может”, а ты, вот, попробуй поуправлять такими сложными коллективами! Руководить же кандидатами и докторами наук, членами-корреспондентами и академиками, не будучи таковым довольно сложно – это можно делать только в аварийном режиме. Не зря АН СССР и теперешнюю РАН называли и называют профсоюзом директоров институтов. Если ты член-корреспондент (научный камер-юнкер)

или академик (камергер), но не научно-образовательный начальник (бывший или теперешний), то ты без сомнений настоящий учёный.

В феврале 2024 года наша академия наук отмечала 300-летие. В связи с этим и по другим причинам членам РАН были вдвое повышены выплаты. Сразу вспоминается такой поучительный исторический анекдот.

Однажды английская королева Виктория посетила Гринвичскую обсерваторию. Она полагала, что там сидят некие учёные чудачки, через телескопы считающие звёзды. Но ей объяснили, что здесь помимо прочего создаются таблицы и приборы (хронометры, компасы, секстанты и проч.), без которых немислимо плавание английского военного и торгового флота по мировому океану. Во время разговора с директором обсерватории высочайшая особа поинтересовалась, какая у него зарплата. Когда королева услышала ответ, она возмутилась и повелела вдвое увеличить жалование всем работникам обсерватории. Директор поблагодарил, но попросил повысить жалование только на 20 процентов. Королева удивилась и спросила: "Почему?" Директор ответил: "Если мне повысить оклад вдвое, то моё место займёт не астроном, а какой-нибудь лорд-бездельник".

И ещё. Большинство академий наук мира не делают выплаты всем своим членам, а собирают с них членские взносы.

Истинного учёного всегда обуяревают сомнения в том плане, учёный ли он, первооткрыватель ли

он. Настоящий учёный электротехник или теплотехник быстро переходит в разряд учёного физика. Правда, в нашей стране изобрели некое "чистилище", переходную камеру – электрофизику и теплофизику. Мало было просто иметь разделы физики, связанные с электричеством или теплом. На мемориальной табличке К.А. Круга написано несколько лукаво – заслуженный деятель советской электротехники. Тем самым данная область теории и практики как бы отгораживалась от общемировой физики. Отсюда трудно понять, кто это – учёный или менеджер научных и образовательных проектов. Союз "или" тут может плавно переходить в союз "и" с разной глубиной такого перехода.

Поговорим о физиках – тепло- и электрофизиках. Об их сомнениях и раздумьях на тему честный ли он человек в научном, общежитейском и даже уголовном планах. Да-да, в уголовном – не нарушает ли он закон? Остается ли он, как писал Достоевский, относительно честным человеком, то есть человеком, которому *"не пришлось сделать чего-нибудь особенно бесчестного?"*.

Многим физикам приходится нарушать закон, гласящий, что в нашей стране в научно-технических расчётах необходимо применять только Международную систему единиц физических величин СИ. В физике же до сих пор в широком ходу система СГС (CGS – сантиметр-грамм-секунда), основы которой заложил великий Гаусс. Популярна также и атомная система измерения физических величин, базирующаяся на постоянной Планка.

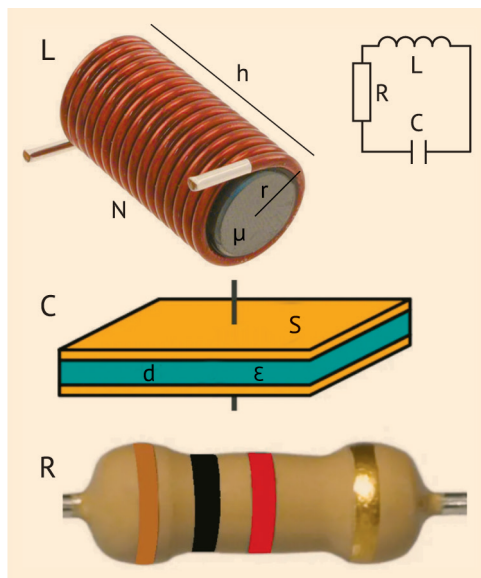


Рис. 2. Элементы колебательного контура

Разрешить этот юридический и научно-образовательный³ казус и очистить метрологическую совесть учёных-физиков призвано новое направление в информационных технологиях – машинная обработка физических (экономических, информационных) величин с привлечением элементов искусственного интеллекта. В настоящее время учёные-профессора электро- и теплофизики сами не могут толком до конца разобраться, в каких единицах измерять электрические и магнитные параметры и температуру, но пытаются учить этому студентов. Их спасает лишь то, что в нашей стране, как отметил ещё Салтыков-Щедрин, строгость законов смягчается необязательностью их исполнения.

³ Сивухин Д.В. О Международной системе физических величин // Успехи физических наук. Том 129 С. 335–338 (1979). https://ufn.ru/ufn79/ufn79_10/Russian/r7910h.pdf

Для иллюстрации сказанного рассмотрим классическую задачу электротехники – расчёт электромагнитного колебательного контура, состоящего из катушки индуктивности L , электрического конденсатора⁴ C и резистора R . На рис. 2 показана схема этого контура и его отдельные элементы с геометрическими, магнитными (μ) и электрическими (ϵ) параметрами. Давайте составим и решим дифференциальное уравнение такого контура, предварительно рассчитав индуктивность катушки и ёмкость конденсатора. И решим задачу на компьютере с использованием единиц физических величин. Эти единицы заодно выполняют функцию ремарок в расчётах, делающих излишними какие-то дополнительные комментарии. Сам же расчёт – это некий тест для электрофизиков и топ-менеджеров научных и образовательных проектов электротехнической направленности. Вполне вероятно, что СИ разрабатывали не учёные, а эти самые топ-менеджеры от науки с такой главной целью – увековечить в единицах физических величин имена великих учёных и изобретателей главных европейских научных и... колониальных держав. Широкая публика давно уже забыла бы про Блеза Паскаля, если б не единица давления. В СИ очень мало американцев и совсем нет русских учёных. Говорят, было предложение назвать составную единицу удельной молярной энтропии в честь Д.И. Менделеева (Md), но оно не прошло, в том числе и из-за русофобии.

⁴ Конденсаторы есть и у теплотехников – пар из турбины конденсируется в них.

$$\mu := 100 \quad N := 2000 \text{ ВИТКОВ} \quad h := 20 \text{ см} \quad r := 30 \text{ мм}$$

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{м}} \approx 1.2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{м}} \approx 1.398 \cdot 10^{-16} \frac{\text{С}^2}{\text{м}^2}$$

$$L := \mu \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{h} \approx 7.1061 \text{ H} \approx 7.906 \frac{\mu\text{С}^2}{\text{см}}$$

Рис. 3. Расчёт индуктивности катушки

Но есть химический элемент с обозначением *Md*. Можно также упомянуть историю с химическим элементом курчатовий-резерфордий. Ходит байка (баян) о том, что химический элемент бериллий ну если не назван в честь Лаврентия Берия, то как-то связан с ним. Если б этого руководителя советского атомного проекта не расстреляли в 1953 г., то вполне вероятно, что наш главный ядерный институт носил бы имя не Курчатова, а Берии.

На рис. 3 показан расчёт индуктивности катушки *L*, а на рис. 4 – ёмкости конденсатора *C*. Расчёты предельно упрощены. Их “изюминка” – работа с магнитной и электрической постоянными (μ_0 и ϵ_0), призванная примирить непримиримых сторонников законной СИ и беззаконной (запретной) системы СГС. А запретный плод всегда сладок. Да и привычка – это, как известно, вторая натура. Разработчики СИ, руководствуясь благими намерениями⁵, довольно нехорошо поступили с физиками.

⁵ Повторяем, одно из них – это увековечивание в единицах измерения имён учёных из Европы и США. Но нет азиатских, африканских и латиноамериканских учёных. Такой вот неокOLONИализм.

Магнитная постоянная μ_0 (рис. 3) встроена в использованную расчётную компьютерную среду. Значение этой константы для контроля выведено “на печать” три раза – в единицах СИ (генри, делённые на метры – точно и приближенно) и в единицах СГС (секунды и сантиметры). Ответ – искомое значение индуктивности катушки выведено дважды – в единицах СИ (генри) и в единицах СГС (секунды, вернее, микросекунды и сантиметры). Там ещё используются экзотические статгенри (*stathenry*) – см. рис. 5. То, что “на печать” выводятся приближённые численные ответы, свидетельствует знак примерно равно. Если б ответ был абсолютно точным, то знак примерно равно превратился бы в знак равно. Это будет показано и на рис. 4, где отображён расчёт ёмкости конденсатора, выданный в пикофарадах (СИ) и сантиметрах (СГС). Отметим, что есть система физических величин, где и индуктивность измеряется тоже сантиметрами⁶. Как это согласуется с тем фактом, что магнитная и электрическая

⁶ <https://community.ptc.com/t5/Mathcad/One-electrical-task/m-p/927608#M210218>

$$S := 100 \text{ cm}^2 \quad d := 5 \text{ mm} \quad \varepsilon := 1.0006$$

$$\varepsilon_0 \approx 8.8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \approx 7.958 \cdot 10^{-2}$$

$$C := \varepsilon \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \approx 17.719 \text{ pF} \approx 15.92 \text{ cm}$$

Рис. 4. Расчёт ёмкости конденсатора

постоянные связаны со скоростью света в вакууме (см. вторую формулу внутри графика на рис. 5), разговор особый. Эта формула, кстати, выводится из знаменитых уравнений Максвелла. Максвелл же – это не только учёный, но и единица магнитного потока (Мх, Мкс) в системе СГС. Но разработчики СИ бесцеремонно переименовали эту единицу в вебер (Wb, Вб). Вот так поступили разработчики СИ с одним из самых выдающихся учёных в области электричества и магнетизма. А самый, наверно, знаменитый их них – Фарадей. Но он скорее экспериментатор, разработки которого дали Максвеллу возможность написать упомянутые уравнения. Поэтому-то сантиметры и были переименованы в фарады (шутка!).

Вторая строка решения на рис. 4 многих удивит – размерная величина (фарады на метры) приравнивается к безразмерной. Это следствие работы с данной вычислительной системой. В чреве компьютера всё будет сделано правильно, но при выводе “на печать” пользователю предоставляется возможность выби-

рать не только единицы измерения, но и системы единиц измерения.

Определив значения индукции катушки (рис. 3) и ёмкости конденсатора (рис. 4), а также задав значение сопротивления резистора R (сто килоом), несложно построить график изменения во времени заряда в конденсаторе – см. рис. 5. Используется численный метод решения задачи Коши для обыкновенного линейного дифференциального уравнения второго порядка, в которое заложен второй закон Кирхгофа и первый (он и последний) закон Ома для полной цепи, на котором срезался наш злополучный студент, сдававший экзамен по ТОЭ профессору Кругу. Но можно условно говорить и о трёх законах Ома – для конденсатора, для резистора и для катушки – для трёх слагаемых левой части нашего дифференциального уравнения, записанного вместе с начальными условиями в рамочке на рис. 5. Его правую часть, кстати, можно сделать ненулевой – ввести в схему и источник ЭДС. Пока там именно ноль вольт, а не просто ноль.

$$R := 100 \text{ k}\Omega \approx (1.113 \cdot 10^{-7}) \text{ statohm}$$

$$L \approx 7.106 \text{ H} \approx (7.907 \cdot 10^{-12}) \text{ stathenry}$$

$$C \approx 17.708 \text{ pF} \approx 15.915 \text{ cm}$$

Solve

$$q(0 \text{ s}) = 1 \text{ C} \quad q'(0 \text{ s}) = 0 \text{ A} \quad \frac{q(t)}{C} + R \cdot q'(t) + L \cdot q''(t) = 0 \text{ V}$$

$$q := \text{odesolve}(q(t), t_{\text{end}})$$

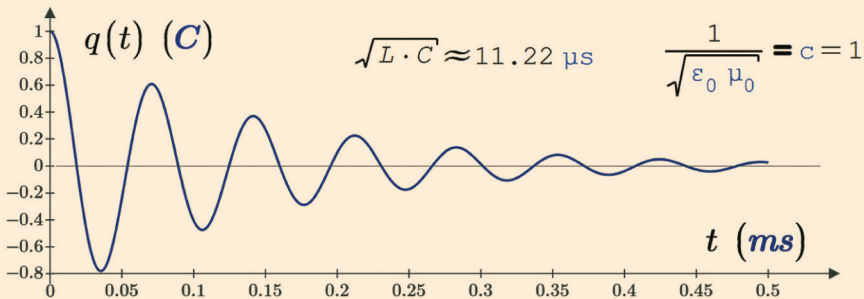


Рис. 5. Расчёт колебательного контура

Если электрическое сопротивление сделать нулевым, то мы получим синусоиду, отображающую гармоническое незатухающее колебание в электромагнитном контуре с периодом примерно 11 микросекунд – см. первую формулу над графиком на рис. 5. Данная задача обсуждалась на форуме: https://en.smath.com/forum/yaf_posts84746_From-pic-to-SMath.aspx.

Дифференциальное уравнение, показанное на рис. 5, само по себе красиво и предельно лаконично: первая константа (C^{-1}) умножается на функцию одного аргумента, вторая константа (R) умножается на первую производную этой функции, а третья константа (L) умножается на вторую производную. Первая константа – это величина обратная ёмкости, называемая эластанс

(эластичность). Единица эластичности – это дараф (*daraf* – *farad* в обратную сторону). Где-то вместо сименса используются единица проводимости *mho* – *ohm* (Ω) в обратную сторону. Как тут не вспомнить знаменитое абырвалг (главрыба) из булгаковской повести “Собачье сердце”.

Кстати, об аналитическом решении дифференциального уравнения.

Студенты МЭИ когда-то распевали такую песню:

Гордится Франция Фабри,
 Германия гордится Кантом,
 А наше славное МЭИ
 Гордится Вале́й Фабрикантом!

Про В.А. Фабриканта, руководившего в МЭИ кафедрой физики, которая сейчас носит его имя, ходила другая байка, связанная уже не

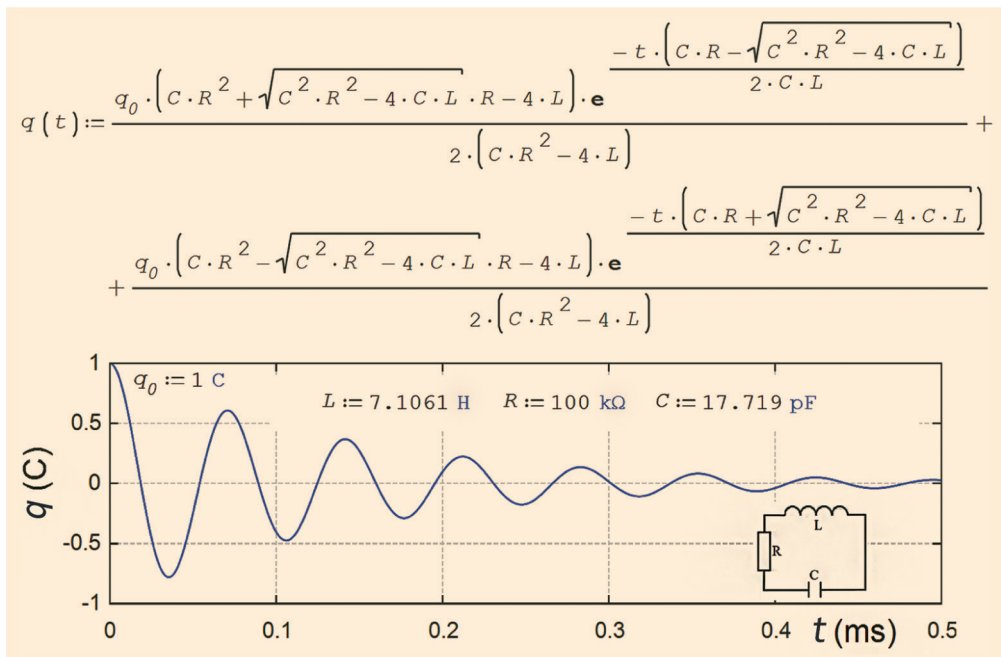


Рис. 6. Пример аналитического решения дифференциального уравнения

со студентом, а с аспирантом. Если аспирант в процессе работы над диссертацией приносил Валентину Александровичу составленное дифференциальное уравнение, но без его аналитического решения, то профессор Фабрикант не хотел даже смотреть на него – и на аспиранта, и на уравнение – он хотел смотреть в зачётку: что там у него стоит по математике!? Аспиранту из-за этого приходилось упрощать уравнение, линеаризовать его, что нередко выхолащивало само исследование. Если же аспиранту все-таки удавалось найти аналитическое решение, то оно часто оказывалось таким громоздким, что с ним практически невозможно было работать. Вот как, к примеру, выглядит аналитическое решение нашего простенького дифференциального

уравнения колебательного контура (рис. 6), полученное на... смартфоне с заходом на один из математических сайтов. О таких решениях в середине прошлого века приходилось только мечтать: аспирант вытаскивает из кармана маленькую плоскую коробочку, стучит по ней пальцами и получает... решение дифференциального уравнения.

Если описанное дифференциальное уравнение усложнить – учесть нелинейность (например, зависимость сопротивления резистора от силы, протекающего в нём тока, ёмкости конденсатора от приложенного к нему напряжения и др.), то аналитического решения можно и не получить. Численное же решение будет получено. Но его необходимо проверять на адекватность – сравнивать с аналитическим

решением, а его нет. Получается некий заколдованный круг. Кстати, решатель, который записан под дифференциальным уравнением на рис. 5 (функция *odesolve*), способен сам выбирать метод интегрирования (численного решения задачи) с учётом жёсткости, если мы имеем дело с системой дифференциальных уравнений. А такую систему несложно получить, сведя уравнение второго порядка к двум уравнениям первого порядка.

Колебательные контуры с их резонансами когда-то были основой радиотехники. Передающая антенна – это ни что иное как некий своеобразный развернутый колебательный контур. В настоящее время радио почти полностью перешло на “цифру”, пойдя славный путь от радиоламп через транзисторы к интегральным микросхемам. Одновременно в математике произошёл переход от аналитических решений дифференциальных уравнений (рис. 6) к численным (рис. 5). Но в последнее время наблюдается некий радиотехнический ренессанс – возрождение ламповых усилителей (рис. 7) и для виниловых проигрывателей. Эти цветомузыкальные установки генерируют не только звук, но и приятное ностальгическое мигание тёплого света катода электронных ламп. Раньше их прятали в чреве радиоприёмников, а теперь выставляют наружу не только по эстетическим, но и по теплотехническим соображениям – для лучшего охлаждения. Кроме того, для большего эффекта такие устройства дополняют аналоговыми, а не цифровыми индикаторами



Рис. 7. Образец современного лампового радиоприёмника

(см. рис. 7), через стекло которого видно, как поворачивается катушка индуктивности, а вместе с ней и стрелка прибора. Можно ожидать появления и ламповых видеомагнитофонов – катушечных и кассетных.

Есть меломаны, утверждающие, что аналоговый звук ламп или транзисторов намного лучше цифрового звука микросхем. Но из всех меломанов отличить цифровой звук от аналогового смог только... осциллограф. Есть, правда, утверждение, что при ядерном взрыве все транзисторы и микросхемы будут уничтожены, а лампы останутся в строю!

Радиотехнический ренессанс принимает и такую форму. Появились компьютерные программы, позволяющие на экране дисплея собирать... схемы ламповых или полупроводниковых радиоприёмников с резисторами, конденсаторами, катушками (рис. 2), лампами (рис. 7), транзисторами... Но не в целях проектирования радиотехнических устройств, а в плане ностальгии по



Рис. 8. Мемориальная доска В.А. Кириллина

детству, когда мы собирали детекторные, ламповые и транзисторные приёмники...

Одной из целей перехода от аналоговой техники к цифровой было и сокращение энергопотребления, а также защита от перегрева – снижение температуры. Затухающее колебание, показанное на рис. 5 и 6, иллюстрирует тот факт, что начальная электрическая энергия заряженного конденсатора постепенно переходит в тепловую энергию. Температура резистора R повышается и тепло передаётся в окружающую среду. Вот мы и добрались до температуры – перекинули некий мостик от электротехники к теплотехнике.

У входа в административный корпус МЭИ есть мемориальная доска В.А. Кириллину (рис. 8). Надпись на ней можно конкретизировать и оmodernить – не просто учёный, а учёный-теплофизик, не организатор науки, а топ-менеджер научных проектов.

Пара слов о теплофизике. В настоящее время эту научную дисциплину пытаются упразднить. Вспоми-

нается история с Советским Союзом. Его создавали титаны, а упразднили пигмеи. Кириллин был одним из тех титанов, кто создавал советскую теплофизику.

Итак, мы идём вдоль стен МЭИ от одной мемориальной доски к другой и переходим от электричества к теплу, к температуре⁷.

В системе СГС три основные единицы, из которых составляются другие единицы – скорости, силы, мощности, индуктивности и т.д. Но там нет единицы температуры – одной из семи основных единиц СИ. Однако температуру можно скомпоновать из расстояния (сантиметр), массы (грамм) и времени (секунда). Об этом подробно написано здесь: <http://tw.twt.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf>. Можно также привести цитату из знаменитого учебника по теоретической физике Ландау и Лифшица⁸: "...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 эргами 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 к температуре, измеренной

⁷ Кстати, в некоторых славянских языках температура – это теплота.

⁸ Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. М.: Наука, 1960 и 1981 гг. (https://scask.ru/c_book_t_phis5.php?id=11).

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”.

В настоящее время предпринимаются попытки связать кельвин с постоянной Больцмана. А нужно делать наоборот – связывать постоянную Больцмана с единицей температуры, вытекающей из закона идеального газа $pV = T$.

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 почти 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-то и таится загадка о том, почему температура стала не просто отдельной физической величиной, а именно основной физической величиной в СИ. Об этом косвенно свидетельствует и тот факт, что до 1968 г. кельвин официально именовался градусом Кельвина. А градусы в те времена повсеместно изгонялись из метрологии⁹ и переводились в разряд вспомогательных величин. Вспомним угловые градусы, градусы твёрдости, градусы Энглера (вязкость жидкости), граду-

сы жёсткости 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 ковёр. Кстати, градус Ренкина (заокеанский аналог градуса Кельвина, кельвина) так и остался градусом Ренкина: ренкинов (единиц температуры) в метрологии нет и не предвидится. Есть также и градус Реомюра. 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: дошёл до 35.8° и в нерешимости остановился...”. Несложно подсчитать: 35.8° Re = 44.75 °C (вода при нормальном давлении кипит при 80° Re и замерзает при 0° Re или 0 °C).

Примерно в середине XIX века Джоулем был найден эквивалент механической и тепловой энергии (см. ниже). Да, эти два вида энергий можно измерять одними и теми же единицами – джоулями или калориями. Но мы принципиально разделяем эти энергии на два рода – энергия первого рода и энергия второго рода. Это отличие внешне выражается, в частности, в том, что наши теплоэлектроцентрали вырабатывают электрическую энергию, измеряемую в мегаватт-часах, а тепловую энергию – в гигакалориях. Разными единицами лишний раз подчеркивается то, что это разные виды энергии по своей сути и по своей ценности. Так вот, температуру тоже можно измерять в джоулях, калориях или электронвольтах, условно отмечая при этом, что это энергия третьего рода. Бог любит троицу!

⁹ Очков В.Ф., Орлов К.А. Градусы в физических величинах компьютерных вычислений // Мир измерений. № 3–4, 2020. (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/Degrees.pdf>)

$$V := 40 \text{ L} = 0.04 \text{ m}^3 \quad p := 150 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \approx 1.471 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

$$M_{\text{Ar}} := 39.944 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0.039944 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$T := 20 \text{ }^\circ\text{C} \approx 2437 \frac{\text{J}}{\text{mol}} = 293.15 \text{ K} = 527.67 \text{ }^\circ\text{Ra} = 68 \text{ }^\circ\text{F} \approx 0.02526 \text{ eV}$$

$$\boxed{p \cdot v = T}$$

$$v := \frac{T}{p} \approx 0.1657 \frac{\text{L}}{\text{mol}} \quad S := \frac{V}{v} \approx 241.4 \text{ mol} \quad m := S \cdot M_{\text{Ar}} \approx 9.64 \text{ kg}$$

Рис. 9. Расчёт массы газа в баллоне

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

На рис. 9 показано решение такой опять же простенькой задачи, но уже не из области электротехники (рис. 3 и 4), а из области теплотехники – термодинамики. В баллоне вместимостью 40 литров (V) находится аргон при абсолютном давлении 150 технических атмосфер (p) и температуре 20 градусов по шкале Цельсия (T). Необходимо определить (оценить) массу аргона

в баллоне, используя закон идеального газа $pv = T$, где v – удельный молярный объём. В расчёт вводится также и значение молярной массы аргона M_{Ar} .

Задача фактически сводится к машинному переводу значений именованных чисел (действительных чисел, которые являются значением какой-либо физической или иной величины и сопровождаются названием единицы измерения) к базовым значениям. При этом температура переводится не в кельвины, а в джоули, делённые на моли. Но температура может выводиться “на печать” в любых единицах, к которым привык пользователь, что и показано на рис. 9. Температура выводится, в том числе и в электронвольтах (eV), их по-прежнему широко используют физики. Универсальная газовая постоянная переводится из разряда физико-химических констант в разряд переводного коэффициента единиц температуры из кельвинов в базовую составную единицу температуры. Закон идеального газа при этом получает чёткую и лаконичную запись: $pv = T$.

Рис. 10. Технико-экономическая оценка качества двух накопителей информации

$$\begin{aligned}
 HD_1 &:= 128 \text{ GB} = 1.28 \cdot 10^{11} \text{ B} \\
 \text{Цена}_1 &:= 2580 \text{ RUB} = 31.66 \text{ USD} \\
 \frac{HD_1}{\text{Цена}_1} &= 49.61 \frac{\text{MB}}{\text{RUB}} & \frac{HD_1}{\text{Цена}_1} &= 4.043 \frac{\text{GB}}{\text{USD}} \\
 HD_2 &:= 1 \text{ TB} = 1 \cdot 10^{12} \text{ B} \\
 \text{Цена}_2 &:= 300 \text{ USD} = 24450 \text{ RUB} \\
 \frac{HD_2}{\text{Цена}_2} &= 40.9 \frac{\text{MB}}{\text{RUB}} & \frac{HD_2}{\text{Цена}_2} &= 3.333 \frac{\text{GB}}{\text{USD}}
 \end{aligned}$$

При таком раскладе удельная молярная энтропия наконец-то станет безразмерной величиной. А энтропия, как известно, имеет общий чёткий физический смысл – логарифм числа доступных состояний системы. Логарифм же – это сугубо безразмерная величина. Постоянная Больцмана при этом становится равной обратному значению числа Авогадро. С логарифмом, кстати, связаны такие специфичные единицы измерения, как бел, децибел, непер, pH . Затрагиваемые в этой статье компьютерные средства решения задач способны работать и с данными псевдоединицами физических величин, широко используемых в радиотехнике и акустике как атавизм ручных расчётов. Их ввели с той же благой целью, с какой ввели кельвины – удобство ручных расчётов (см. цитату выше). Компьютер также позволяет убрать логарифм из определения энтропии. В природе нет никаких логарифмов. Их придумал человек опять же для удобства ручных расчётов. Переход на компью-

терные расчёты даёт возможность отказаться от логарифмов. Это повлечёт за собой и необходимость пересмотра системы единиц физических величин.

Критикуют СИ и за то, что она не охватывает нефизические величины – значения стоимости и количества информации, например. Современные компьютерные средства решения задач исправили эту не совсем нормальную ситуацию. На рис. 10 показан такой машинный расчёт: необходимо из двух накопителей информации выбрать один. Первый накопитель имеет ёмкость 128 гигабайт (GB) и стоит условно 2580 российских рублей, а ёмкость второго – один терабайт (TB), и стоит он 300 американских долларов. Ответ: нужно остановиться (при прочих равных условиях) на первом накопителе, так как у него более высокое значение отношения ёмкости к стоимости. Система машинного счёта не только делает правильные пересчёты единиц измерения, но знает текущий курс валют.

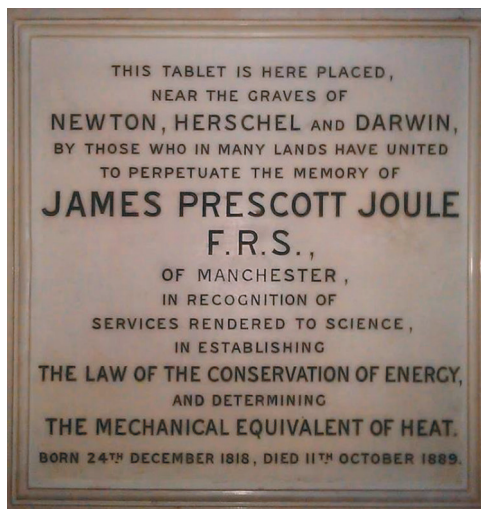


Рис. 11. Мемориальная доска Джоуля

Мы начали эту статью с мемориальной таблички и закончим её мемориальной табличкой, фото которой автор сделал в Вестминстерском аббатстве в Лондоне.

Если калорию (тепловая энергия) переводить в джоуль (механическая энергия), то нужно использовать коэффициент с примерным значением 4.19 (*mechanical equivalent of heat* – см. рис. 11). Автор предлагает праздновать день теплоэнергетика 19 апреля каждого года. День энергетика празднуют 22 декабря – в самый короткий световой день. А к какой дате приурочить день электроэнергетика? И стоит ли вообще, рвать день энергетика на два отдельных дня – день теплоэнергетика и день электроэнергетика?

И последнее.

Приведённые в статье расчёты выполнены в программной среде, характеризуемой цитатой из “Женитьбы” Гоголя: “Если бы губы Никанора Ивановича да приставить

к носу Ивана Кузьмича, да взять сколь-нибудь развязности, какая у Балтазара Балтазаровича, да, пожалуй, прибавить к этому ещё дородности Ивана Павловича – я бы тогда тотчас же решилась. А теперь – поди подумай!”

Наиболее известные математические программы для инженерных и научно-технических расчётов с единицами измерения такие: *Mathcad*, *SMath* и *Maple Flow*. У экосистемы *Python* есть некоторые возможности работы с физическими величинами¹⁰. Две первые программы – *Mathcad* (американский *SMath*) и *SMath* (русский *Mathcad*) – были использованы для создания рисунков данной статьи, которые представляют собой некие коллажи. Да, если бы возможности *Mathcad* да приставить к “отечественности” и свободной “распространяемости” *SMath*, да взять символьную математику, как у *Maple*, да, пожалуй, прибавить к этому ещё “программности” *Python*, то... В среду *Mathcad*, кстати, встроены и СИ, и система СГС, которую никто не собирается отменять.

В настоящее время автор со своими коллегами работает над созданием такой расчётной программы, которая сможет удовлетворить капризную гоголевскую невесту “Агафью Тихоновну” – пользователя компьютерной вычислительной системы с элементами ИИ и с учётом физических величин.

¹⁰ Очков В.Ф., Орлов К.А., Чудова Ю.В., Ивашов А.П., Тихонов А.И. Информационные технологии в инженерных расчётах: *SMath* и *Python*. М.: Издательство “Лань”, 2023. (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/EC-SMath.pdf>)