Двигатель внешнего удаленного сгорания
или
Изучаем термодинамику по-новому!

Постой, паровоз, не стучите, колеса.
Есть время взглянуть судьбе в глазаааааааа.

Старинная народная песня
(https://dzen.ru/a/ZMtfzkJnRBNP9s_j)

В статье описан расчет и графическое отображение цикла бестопочного паровоза, приведший к рассуждениям о современных проблемах теплотехнического образования, в частности, о преподавании технической термодинамики в вузах с привлечением современных информационных технологий.

Все знают такое выражение – КПД как у паровоза. Между тем, рабочий цикл такого, как говорили раньше, сухопутного парохода – это цикл Карно (две изотермы и две адиабаты), у которого, как известно, самый высокий термический КПД по сравнению с другими термодинамическими циклами: Отто, Дизеля, Ренкина, Тринклера, Брайтона и т.д. Низкий КПД паровоза объясняется отсутствием у него конденсатора, снижающего нижнюю температуру «паровозного» цикла Карно. Ну и верхняя температура не особо высокая. Были попытки создания паровозов с конденсацией выходящего из цилиндров паровой машины пара и возврата воды в котел. Но это делалось скорее для экономии воды, а топлива. Паровозы на станциях заправлялись не только углем, но и водой, требующей специальной водоподготовки, снижающей накипеобразование в паровом котле. А в засушливых районах Земли с водой были проблемы. Вспомним знаменитый Турксиб! Кроме того, выпускаемый из цилиндров паровоза пар, направлялся в дымовую трубу для создания тяги воздуха в топке. Паровозная труба – это своеобразный эжектор – некое конусное устройство, выполняющее функции дымососа. Был на паровозе и инжектор, подающий воду в паровой котел (своеобразный питательный насос). В целом все это составляло очень сложную конструкцию – памятник инженерной мысли. Памятник не только в переносном, но и в прямом смысле – на многих железнодорожных станциях стоят паровозы на постаментах[1]. Не редки и ретропоезда на паровозной тяге[2].

[1] В Лондоне у вокзала «Виктория» есть музей, где собраны почти все английские паровозы. А в музее науки и техники этого города работает настоящая паровая машина, вырабатывающая электричество для этого научно-просветительского учреждения. Паровозы когда-то бегали в тоннелях лондонского метро.

[2] Немецкий ученый-теплотехник Ханс-Йохан Кречмар – автор одного из справочников по свойствам воды («таблицы Вукаловича»), друг и коллега автора статьи праздновал свой 60-летний юбилей на поезде узкоколейки, ведомым паровозом. Все это происходило в окрестностях города Циттау на стыке границ Германии, Польши и Чехии. На подарке, который юбиляр получил от автора этой статьи, был прорисован цикл паровой машины с изобарой в 60 атмосфер! В другой свой приезд в Германию автор с этим приятелем катался по Эльбе на колесном ретропароходе с паровой машиной. Во как!

Но все попытки создания конденсационных паровозов, а других усовершенствований прекратились с появлением тепловозов и электровозов. Заметим, что паровые машины пароходов изначально были оборудованы кондиционерами. Поэтому-то они не пыхтели как паровозы – не выпускали резко порции дыма из трубы[3] в такт с ходом поршня паровой машины. В настоящее время паровые машины на кораблях остались, но это не цилиндры с поршнями, а паровые турбины, работающие в паре с электрогенераторами, питающими тяговые электродвигатели, которые крутят гребные винты. Паровой котел при этом может быть ядерным (атомоходы).

А вот про *безтопочный паровоз* (fireless locomotive) не знают даже профессиональные теплотехники[4]. Спел-чекер текстового редактора Word, в среде которого писалась эта статья, тоже не знает такого прилагательного – «бестопочный» и предлагает замену – «безтолочный», т.е. не имеющий никакого толка (бестолочь), что, кстати, в наше время близко к истине. Эти паровозы когда-то давно бегали в шахтах, на нефтеперегонных заводах и бумажных фабриках – везде, где была опасность взрыва или пожара от открытого огня. Об эффективности бестопочных паровозов особо не думали, руководствуясь пословицей: «Не до жиру – быть бы живу!» Сейчас эти локомотивы полностью вышли из употребления – им на смену пришли другие безопасные транспортные средства.

Суть бестопочного паровоза такова. Часть цилиндрической ёмкости (котла-аккумулятора) заполнялась водой, затем она плотно закрывалась и «ставилась на огонь» (внешнее сгорание – см. название статьи). Вспомним скороварку, ускоряющую процесс приготовления пищи. Давление и температура в таком сосуде поднималась до тех пор, пока не… засвистит предохранительный клапан. После этого ёмкость ставили на паровоз и пускали выходящий из неё пар в цилиндры паровой машины. В реальности, конечно, никакую емкость на огонь не ставили, а просто подгоняли бестопочный паровоз к специальной котельной, пар которой через систему труб нагревал воду в котле такого «огнебезопасного» локомотива.

А давайте построим диаграмму такой тепловой машины. Подобную инженерную конструкцию называть тепловым двигателем будет не совсем корректно: топка-то отсутствует – она находится на «удалёнке», как сейчас выражаются учителя и школьники, преподаватели и студенты.

Обычно для иллюстрации процесса нагрева пароводяной смеси используют диаграмму «давление-удельный объем» – p, v диаграмму (рис. 1). На таких и других подобных диаграммах (p, T – давление-температура, T, s – температура-энтропия, h, s – энтальпия-энтропия – диаграмма Молье[5] и др.) прежде всего рисуют две граничные кривые – синюю и

[3] Еще одно «отверстие» для выпуска пара – это паровозный или пароходный гудок. Вспомним поговорку: «Весь пар ушел в гудок!» Эти устройства были не просто сигнальными устройствами, а настоящими музыкальными инструментами, которые настраивали и которыми гордились (вспомним тройку с бубенцами!). Есть даже такая песня: «Паровозным гудком растревожена…» (https://yandex.ru/video/preview/14031788358088779 12).

[4] Бестопочный паровоз звучит как сапоги всмятку. Авторы статьи опросили два десятка своих коллег-теплотехников и теплофизиков, но только один из них сказал, что слышал о таком чуде техники. Потом, правда, оказалось, что он имел ввиду не бестопочный, а бестендерный паровоз – паровоз-танк, на котором емкости (танки) для жидкого топлива и воды располагались по бокам парового котла, а не в прицепном тендере.

[5] Мы часто обижаемся на то, что за рубежом периодическую таблицу химических элементов не называют таблицей Менделеева (1834-1904). У немецких теплотехников такая обида связана с h, s диаграммой, которую

красную, выходящие из критической точки (Cr). Здесь, как правило, упоминают и о тройной точке (второй конец синей и красной линий[6]). Но на диаграммах (кроме p, T диаграммы) эта точка обычно раздваивается, что позволяет говорить не об одной, а о двух тройных точках, соединенных особой линией.

В подписи к рисунку 1 стоит слово «надутая». Что это означает!?

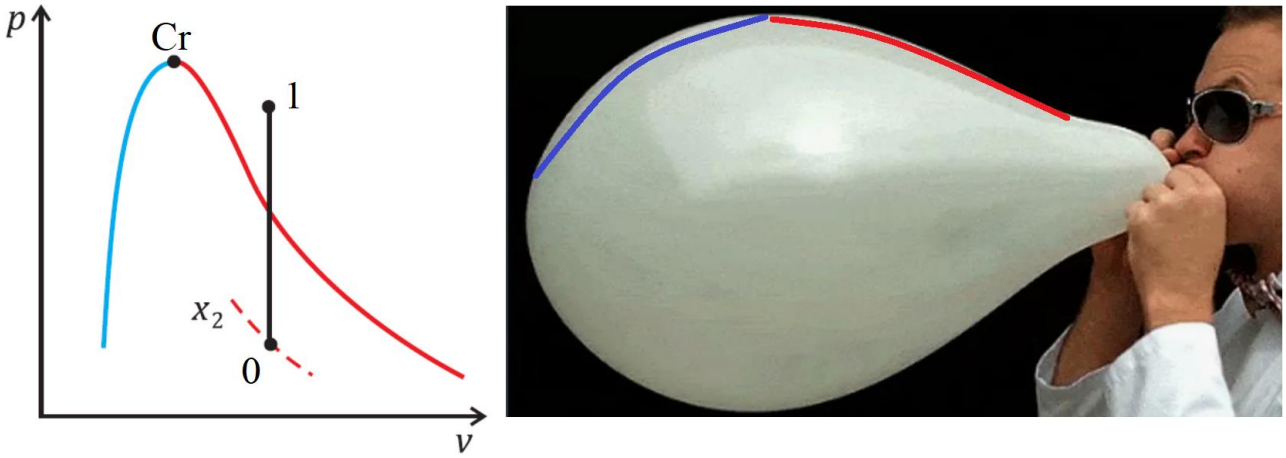


Рис. 1. «Надутая» p, v диаграмма линий насыщения воды и водяного пара

Это означает то, что с этой диаграммой случилась целая драма! Автор статьи затратил уйму времени, пытаясь построить её на компьютере. Возникло даже чуство, что программа SMath, в среде которой это делалось, сломалась. Программу переустановили[7], но и это не помогло. Подозрение пало на графические особенности дисплея компьютера. Встал вопрос о переустановки и Windows… Но оказалось, что диаграмма-то строится, но её не было видно из-за того, что она представляла собой не горбатую кривую с критической точкой вверху (рис. 1), а прямой угол, сливающийся с координатной сеткой графика (левый график на рис. 2). Синяя линия (насыщение по воде) взмывает вверх к критической точке (вода почти не сжимаема), а продолжающая её красная линия (насыщение по водяному пару) отвесно падает вниз и затем резко сворачивает на горизонтальный участок. Увеличение диаграммы (zoom – правый график на рис. 2) показывает, что происходит вблизи нуля этого графика.

вне Германии часто забывают называть диаграммой Рихарда Молье (1863-1935), который впервые построил её в 1903 году в Дрезденском техническом университете, на одном из корпусов которого висит мемориальная доска с именем этого ученого-теплотехника.

[6] «Красная линия, которую нельзя переходить» – избитый пропагандистский штамп. В теплотехнике переход этой линии тоже чреват проблемами. Пар в турбине «пересекает» эту линию и становится влажными – проблематичным в отношении эрозии проточной части. Пар бестопочного паровоза, поступающий в цилиндры паровой машины, изначально влажный, что также влечет за собой некоторые проблемы. В обычном же паровозе есть возможность несколько осушить и перегреть пар, выходящий из «топочного» котла.

[7] Это бесплатно делается за пару минут с сайта www.smath.com.

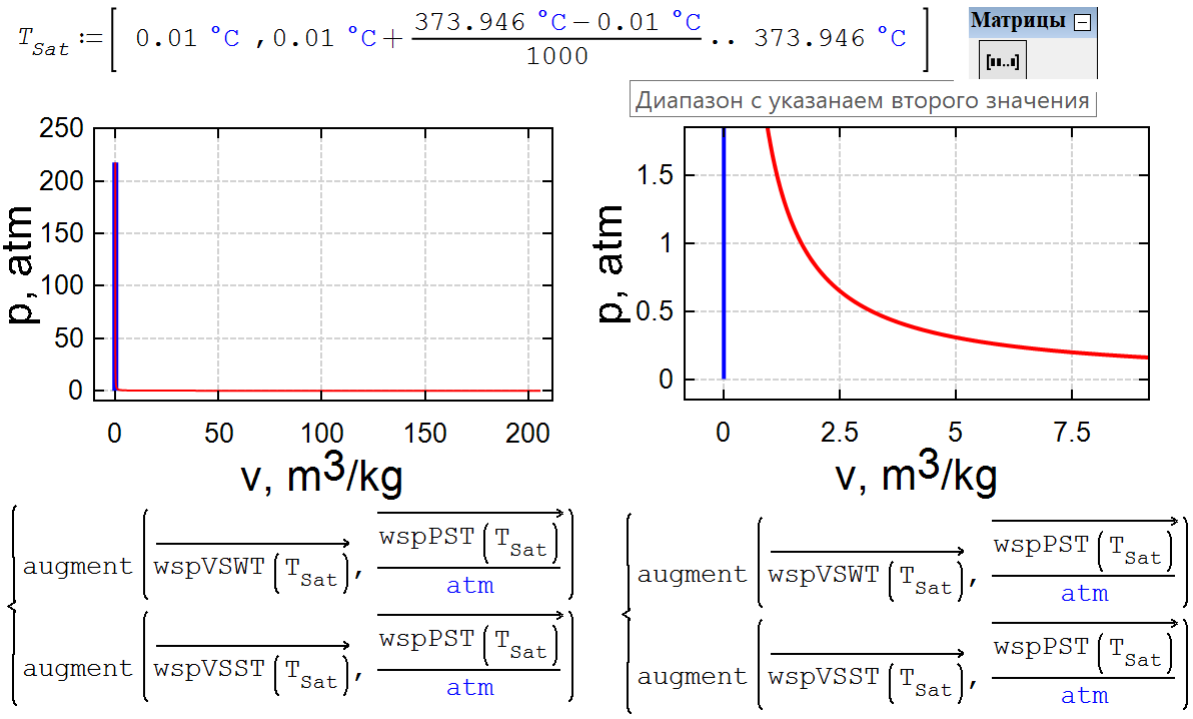


Рис. 2. Истинная p, v диаграмма линий насыщения воды и водяного пара.

Левую диаграмму на рис. 2, можно сказать, *надули* – как-то хитро изменили масштаб оси абсцисс, сделав его нелинейным для того, чтобы получить то, что показано на рис. 1. Вышел не количественный, а качественный график, который кочует из одной книги по термодинамике в другую… При этом «надувают» не только график, но и... студентов, невольно обманывая[8] их, показывая нереальный график. Зачем это делается?

Дело в том, что p, v диаграмма очень востребована при описании процессов с идеальными газами, где нет линий фазовых переходов, а просто $p\ v = T$. Да-да! Нет в этой формуле никакой универсальной газовой постоянной R, являющейся по своей сути простым переводным коэффициентом от кельвинов к истинным единицам температуры – см. рис. 5 и http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-4-2022-pt-T.pdf. Но мы отвлеклись!

График в среде SMath строится довольно просто. В аргумент графика нужно записать матрицу с двумя столбцами, хранящими дискретные численные значения аргумента и функции, отображаемой на графике. Объединяет два вектора в одну матрицу встроенная в SMath функция `augment` (рис. 2). Вектор T_{Sat} заполняется по арифметической прогрессии значениями температуры от температуры тройной точки до критической температуры (1001 точка). Далее вступают в работу функции авторского пакета WaterSteamPro[9] (www.wsp.ru), формирующие три вектора – давление (`P`) насыщения (`wspPST`), удельный объем (`V`) воды на линии насыщения (`wspVSWT`) и удельный объем насыщенного водяного пара (`wspVSST`). Буква `S` обозначает и насыщение (Saturated), и водяной пар (Steam). Стрелочка над именами

[8] Глагол «надувать» в смысле «обманывать» присутствует у Шолохова в «Поднятой целине» – деду Щукарю цыган продал надутую пожилую лошадь (клячу, https://vk.com/wall357070788_6186?ysclid=lx44i7e6fo763141952).
[9] Очков В.Ф. SMath И CoolProp: Теплофизические свойства жидкостей и газов – доверяй, но проверяй // Энергия: экономика, техника, экология, №7, 2023 (https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S0233361923070042)

функций – это оператор векторизации, заставляющий функцию работать с каждым элементом вектора, а не с вектором в целом.

Изучении технической термодинамики начинают с идеальных газов. Потом переходят к реальным *флюидам* – к воде и водяному пару, например, прихватив при этом «старую, добрую» p, v диаграмму. Здесь и возникает проблема «надутости» диаграммы.

Эта проблема решается просто – заменой удельного объема (массового или молярного[10]) на плотность – на обратную величину от удельного объема. Но при такой замене направление работы цикла изменится с привычного «по часовой стрелке» на непривычное – «против часовой стрелки», т.е. против устоявшихся канонов. Исправить это можно, перевернув по горизонтали ось абсцисс – см. рис. 4 и 5. При заметим этом, что есть особая диаграмма цикла Ренкина на воде и водяном паре в таких координатах, что там получается не круг, а некая восьмерка – теплотехнический процесс на одном участке идет по часовой стрелке, а на другом – против. Не будем называть оси такой диаграммы – пусть читатель немного помучается и сам определит их.

Вторая проблема, возникающая при переходе от удельного объема к плотности, связана с одним из основополагающих понятий термодинамики – с *работой*. Её рассчитывают через интеграл с двумя значениями давления в пределах интеграла и с удельным объемом под интегралом[11]. Заменить под интегралом удельный объем на плотность несложно. Сложность возникала, когда попытались такой интеграл взять вручную аналитически. Но в настоящее время интегралы «берутся» в основном численно на компьютере. Упомянутая сложность при этом пропадает, но появляется другая, связанная с особенностями численных методов расчета интегралов. Как говорится, есть математика, а есть прикладная математика численных методов, которая отличается от математики примерно так, как милостивый государь отличается от государя.

Работа с плотностью связана с таким уже не термодинамическим, а если так можно выразиться, лингвистическим нюансом – с отказом от латинской буквы ρ и с переходом на латинскую букву d. Это диктует компьютер: во многих языках программирования нельзя использовать греческие буквы в именах переменных и функций. Кроме того, в компьютерных пакетах по свойствам флюидов уже давно присутствует буква D (density), обозначающая плотность.

Нет теплотехнического расчета, в котором бы не присутствовала *температура*.

Автор никак не забудет одну школьную незаслуженную обиду. Спросил его учитель, чему равен синус 45 градусов. Автор не пытался тупо запомнить таблицу тригонометрических

---

[10] Молярный объем воды – это тоже своеобразные сапоги всмятку (см. сноску 4). Дело в том, что вода – это не простая механическая смесь молекул с одним атомом кислорода и двумя атомами водорода (H_2O – 18 г/моль), а более сложное соединение с водородными связями. Молярная масса такой воды зависит от многих параметров. Когда-то полагали, что магнитное поле может рвать водородные связи воды, меняя её свойства (Очков В.Ф. Физика и метафизика магнитной обработки воды // Энергия: экономика, техника, экология. № 1, 2022, С. 36-43, http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Energia-MO-1-2021.pdf).

[11] В романе «Анна Каренина» Л.Н. Толстого Константин Левин (alter-ego Толстого) читал книгу Тиндаля о теплоте и рассуждал об интегралах (Очков В.Ф., Очкова Н. А. Лев Толстой и математика /– Москва: МПГУ, 2023, http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Tolstoy-Math-3.pdf)

функций, а старался рассчитывать в уме нужные значения. Итак: угол в 45 градусов присутствует у равнобедренного прямоугольного треугольника. Допустим, что оба его катета равны единице, тогда гипотенуза по Пифагору равна корню из двух. А синус – это отношение противолежащего катета к гипотенузе. Ответ был таков – единица, деленная на корень из двух! Учитель сказал: «Вот эту-то единицу я тебе и поставлю в журнал! Синус 45 градусов равен корню из двух, делённому на два!».

Эта обида повторилась в наше время, но уже не в отношении к синусу, а в отношении к температуре. Попалась одна статья автора с записью $T_0 := 18°C$ на глаза одному маститому теплофизику. Он её пролистал и сказал: «Автор – безграмотный в термодинамике человек! Если в расчет вводится температура по шкале Цельсия, то ее заносят в переменную t. В переменную же T записывают абсолютную температуру в кельвинах! Я не буду смотреть статью дальше!». Этот «маститый теплофизик» был тоже «надутым» (см. рис. 1). Увы, есть такие академики и члены-корреспонденты, которые не имеют особых научных заслуг, но занимают высокие должности и поэтому считают, что они умнее всех и могут всех поучать.

Итак! Запомним раз и навсегда! В физико-математических пакетах с поддержкой единиц измерения, к коим относится и SMath, температура и все прочие физические величины вводятся в расчет с любыми единицами, но хранятся они в памяти компьютера в базовых единицах СИ. Что является базовой единицей температуры – это особая тема, которой мы еще коснемся.

Но оставим обиды и вернемся к расчету, показанному на рис. 3.

Паровозов – простых и бестопочных на сверхкритических параметрах, конечно, не было. Но в нашем расчете для наглядности мы примем, что пароводяную смесь нагревают до давления в 240 атмосфер[12], что превышает критическое значение. Была когда-то реальная лаба[13] на кафедре Теоретических основ теплотехники МЭИ, где работает автор. Сейчас она существует в виде цифрового двойника – не кафедра, а лабораторная работа, конечно[14]. Брали толстостенную запаянную стеклянную ампулу, наполовину заполненную водой, (скороварку – см. выше), помещали её в печь и нагревали, наблюдая, как пропадает линия раздела фаз. Теперь все это можно видеть, увы, только на экране компьютера. С другой стороны, на этом экране можно видеть, как меняются параметры воды – в числах и на диаграммах. Самое лучшее решение, конечно, – это одновременная работа и с реальным объектом, и с его математической моделью, реализованной на компьютере. Об этой модели и идет речь в этой статье.

[12] Нагревают, конечно, не до определенного давления, а до определенной температуры. Но на паровозах чаще стоят манометры, а не термометры. Да и использовать здесь нужно не атмосферы, а мегапаскали. Но, читаем статью дальше!

[13] Так студенты называют лабораторные работы, исправляя тем самым этот лингвистический нонсенс. Словосочетание «лабораторная работа» — это масло масляное, если учесть, что работа по-английски labor.

[14] А почему «конечно»? Существуют и цифровые двойники кафедр.

У котла-аккумулятора нашего сверхкритического бестопочного паровоза[15] есть водомерное стекло, по которому можно наблюдать, как будет меняться уровень воды, вернее, когда он появится после начала движении такого сверхкритического паровоза.

Единицы измерения в компьютерных расчетах хороши и тем, что они выполняют функции комментариев, позволяющих легко понять, что хранит та или иная переменная. Тем не менее, раскроим их: *m* – это масса[16], *V* (заглавная) – объем, *v* (прописная) – удельный объем, *D* (заглавная) – расход пара, *d* (прописная) – плотность. Индексы у переменных такие: *w* – вода, *s* – водяной пар, *0* – в котел залили кипяток, *1* – котел закрыли и подняли в нем давление и температуру и *2* – бестендерный паровоз отработал своё и направляется в котельную для новой заправки теплом. Цикл замыкается!

Помогают сделать расчет такие функции уже упомянутого пакета WaterSteamPro: `wspTSP` – температура (`T`) насыщения (`S`) воды и водяного пара в зависимости от давления (`P`), `wspDSWT` – плотность (`D`) на линии насыщения (`S`) воды (`W`) в зависимости от температуры (`T`), `wspDSST` – плотность (`D`) на линии насыщения (`S`) пара (`S`) в зависимости от температуры (`T`). Встроенная в SMath функция `solve` позволяет создавать обратные функции пользователя. Так на основе функции `wspDPT` генерируется функция, возвращающая температуру воды и водяного пара в зависимости от плотности и давления, а на основе функции `wspVPH` – функция, возвращающая давление воды и водяного пара в зависимости от плотности и удельной энтальпии. «На пакет WaterSteamPro надейся, а сам не плошай»: нет нужной функции – создай её сам! Третий и четвертый аргументы функции `solve` – это концы диапазона, где ищутся корни уравнения методом половинного деления. Такое «жонглирование» функциями – встроенными и пользовательскими позволяет легко и быстро решать довольно сложные задачи.

[15] Бензовоз возит бензин, молоковоз – молоко… А бестопочный паровоз возит на себе пар со степенью сухости близкой к нулю (новый смысл термина паровоз!).

[16] Одноименная переменная хранит единицу длины метр, но это разные переменные, отличающиеся и цветом: черный цвет – масса, синий – метр.

В котел-аккумулятор бестопочного паровоза объемом $V := 10\ m^3$ залили $m_{w0} := 5\ t$ кипятка при $p_0 := 1\ atm$ (точка 0), а потом стали его нагревать до давления $p_1 := 240\ atm$ (точка 1). Затем паровоз стал работать, выпуская из котла-аккумулятора пар в количестве $D := 100\ \frac{kg}{min}$ (точка 2). Построить p, d- и T, d-диаграммы цикла работы такого паровоза.

Советский бестопочный паровоз

$T_0 := \text{wspTSP}(p_0) = 99.974\ °C$

$d_{w0} := \text{wspDSWT}(T_0) = 958.4\ \frac{kg}{m^3}$

$d_{s0} := \text{wspDSST}(T_0) = 0.5976\ \frac{kg}{m^3}$

$V_{w0} := \frac{m_{w0}}{d_{w0}} = 5.217\ m^3$ $\quad V_{s0} := V - V_{w0} = 4.783\ m^3$

$m_{s0} := V_{s0} \cdot d_{s0} = 2.858\ kg$ $\quad m_0 := m_{w0} + m_{s0} = 5002.858\ kg$

$d_0 := \frac{m_0}{V} = 500.3\ \frac{kg}{m^3}$ $\quad x_0 := \frac{m_{s0}}{m_0} = 0.0005713$

$T_1 := \text{solve}(\text{wspDPT}(p_1, T\ K) = d_0, T, 100\ °C, 500\ °C)\ K = 374.2\ °C$ Температура в котле после его "зарядки"

$h_1 := \text{wspHPT}(p_1, T_1) = 1852\ \frac{kJ}{kg}$ Удельная энтальпия в котле после его "зарядки"

$t_{end} := \frac{m_0}{D} = 50.03\ min$ $\quad t := \left[0, \frac{0.995 \cdot t_{end}}{100} .. 0.995 \cdot t_{end}\right]$ $\quad m := m_0 - D \cdot t$ $\quad d := \frac{m}{V}$

$k := [1..\text{length}(d)]$ $\quad p_k := \text{solve}\left(\frac{1}{\text{wspVPH}(p\ atm, h_1)} = d_k, p, 0, 250\right) atm$

Рис. 3. Расчет бестопочного паровоза

Мы не показываем операторы, формирующие две переменные с запятой и пробелами в имени *p, d diagram* и *T, d diagram*, по которым строятся соответствующие диаграммы (рис. 4 и 5). Читатель может скачать соответствующий SMath-файл с сайта http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath и не только посмотреть на эти операторы, но и изменить исходные данные и увидеть новый ответ.

На диаграммах рисунков 4 и 5 показаны: изохора 0-1, адиабата 1-2 (котел-аккумулятор бестопочного паровоза покрыт толстым слоем теплоизоляции) и почти изобара-изотерма 2-0, а также изолинии одной сухости пара. У графиков имеется по паре осей – по горизонтали это плотность внизу и удельный объем вверху (нелинейная шкала), а по вертикали – давление в атмосферах физических и в мегапаскалях[17] (рис. 4), а температура (рис. 5) в градусах Цельсиях и в единицах энергии, деленных на единицы количества вещества – kJ/mol.

[17] А ещё есть атмосферы технические (килограмм силы на квадратный сантиметр) и бары (100 000 Pa). Незаконные атмосферы удобнее законных мегапаскалей тем, что сразу видно, насколько давление больше атмосферного. Компьютерные пакеты с механизмом единиц измерения дружественны человеку и тем, что можно использовать «удобные» единицы, а не те, какие предписаны кем-то. Помните историю с атмосферным давлением в сводках погоды, где пытались внедрить малопонятные гектопаскали вместо привычных миллиметров ртутного столба!? Еще одна метрологическая глупость в прогнозах погоды – скорость ветра даётся в метрах в секунду, а не в километрах в час.

Настоящие физики, а не теплофизики измеряют температуру единицами энергии – электронвольтами, например, а не какими-то там выдуманными кельвинами (см. Очков В.Ф., Орлов К.А. p v = T Или Как жить без кельвинов // Энергия: экономика, техника, экология. № 4-5. 2022, http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-4-2022-pt-T.pdf и http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-OchkovVF.pdf).

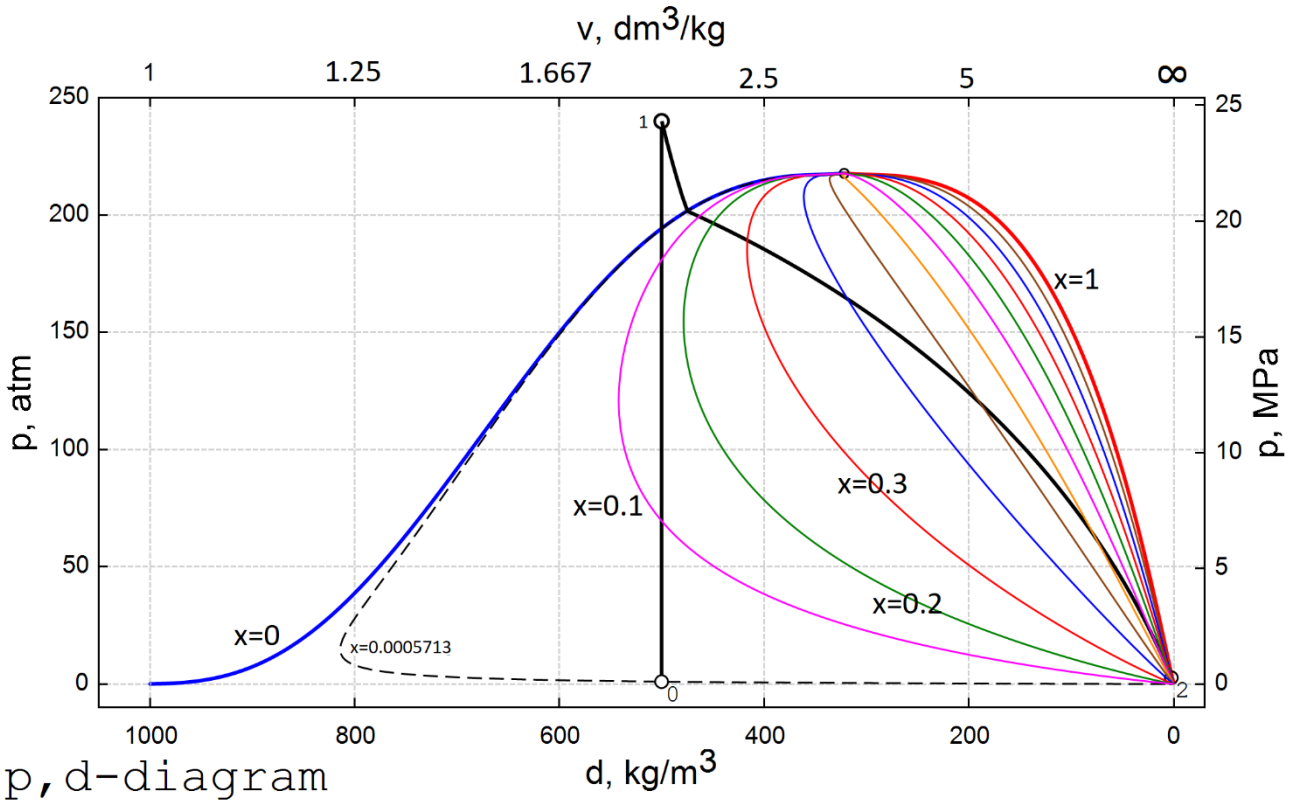


Рис. 4. p, d диаграмма цикла бестопочного паровоза

Отметим, что T, d диаграмма визуально оказалась более «надутой», чем p, d диаграмма.

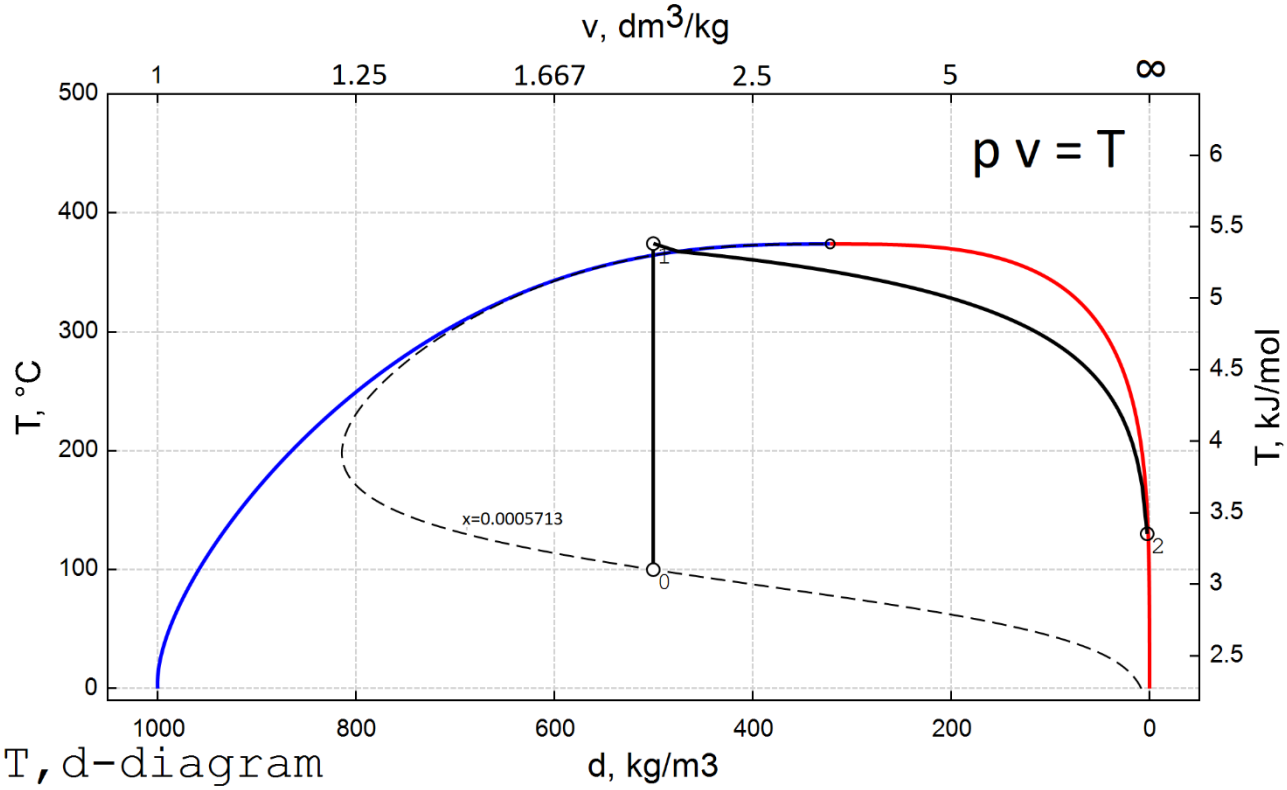


Рис. 5. T, d диаграмма цикла бестопочного паровоза

Кстати, безтопочный паровоз может в ряде случаев выполнять функции пожарного поезда – подъезжать на железнодорожной станции к очагу возгорания и тушить пожар паровоздушной смесью. Есть такой патентованный способ борьбы с огнем – см. книгу «Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет» (под общ. ред. В.Ф. Очкова. 2-е издание, исправленное и дополненное. Издательство БХВ-Петербург. 2015. – 336 с. http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html).

В статье были упомянуты законы идеального газа. Так вот, в современных условиях, когда почти все более-менее сложные научно-технические расчеты выполняются сугубо на компьютере, студенты перестали понимать, зачем столько много времени на занятиях по технической термодинамики уделяется идеальным газам и приемам работы с ними. Ведь есть программы, автоматически рассчитывающие свойства не только воды и водяного пара (см. выше), но и реальных газов. Эффективность (КПД) процесса изучения законов идеального газа становится «паровозным» – очень низким из-за отсутствия мотивации их изучения. А сами лекции по технической термодинамики превращаются в лекции по истории этой научной дисциплины.

Конкретный пример. Котел нашего бестопочного паровоза можно заполнить не водой под давлением в состоянии насыщения, а сжатым воздухом[18]. На рисунке 6 показан расчет массы и температуры воздуха (*wm* – working mass), который адиабатно накачали в баллон ёмкостью

[18] Были и такие экзотические воздухоходы, если так можно выразиться, с баллонами сжатого воздуха (https://ru.wikipedia.org/wiki//Пневматическая_железная_дорога)

10 м^3. Используются функции пакета WaterSteamPro с буквой g – газы: `wspgSGSPT` – удельная энтропия воздуха в зависимости от давления температуры, `wspgTGSPS` – температура воздуха в зависимости от давления и удельной энтропии, а также `wspgVGSPT` – удельный объём воздуха в зависимости от давления и температуры.

$$V := m^3 \qquad wm := \text{"Air"} \qquad T_0 := 18\ °C \qquad p_0 := 1\ atm$$

$$s_0 := \text{wspgSGSPT}\left(wm, p_0, T_0\right) = 6.837\ \frac{kJ}{kg\ K}$$

$$p_1 := 40\ atm \qquad s_1 := s_0$$

$$T_1 := \text{wspgTGSPS}\left(wm, p_1, s_1\right) = 536.1\ °C$$

$$m_1 := \frac{V}{\text{wspgVGSPT}\left(wm, p_1, T_1\right)} = 17.45\ kg$$

Рис. 6. Расчет процесса накачивания воздуха в баллон

При традиционном решении этой задачи в расчет вводится показатель адиабаты, равный для воздуха значению 1.4, а также ряд непонятных студентам формул идеального газа с этой постоянной в степенях. Хотя все понимают, что показатель адиабаты – это не константа, а переменная величина. Формулы непонятны и в том смысле, что непонятно, зачем с ними работать, когда есть простые и понятные функции по свойствам флюидов, встроенные в компьютерные программы – см. рис. 6.

А вот как выглядит расчёт процесса адиабатного стравливания воздуха из баллона с использованием пакета CoolProp Wrapper (напарник-соперник пакета WaterSteamPro) – рис. 7.

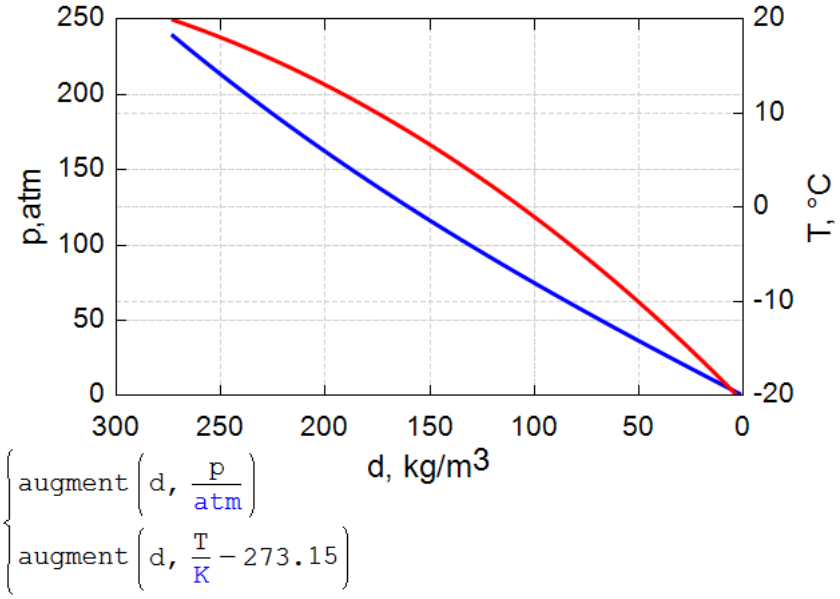
$wm := \text{"Air"} \quad T_1 := 20\ °C \quad p_1 := 240\ atm \quad p_2 := 1\ atm$

$h := \text{CoolProp_Props}\left(\text{"H"}, \text{"P"}, p_1, \text{"T"}, T_1, wm\right) = 378.8\ \frac{kJ}{kg}$

$p := \left[p_1, p_1 - \frac{p_1 - p_2}{1000} \,..\, p_2\right]$

$\overrightarrow{d := \text{CoolProp_Props}\left(\text{"D"}, \text{"P"}, p, \text{"H"}, h, wm\right)}$

$\overrightarrow{T := \text{CoolProp_Props}\left(\text{"T"}, \text{"P"}, p, \text{"H"}, h, wm\right)}$



$\text{augment}\left(d, \frac{p}{atm}\right)$

$\text{augment}\left(d, \frac{T}{K} - 273.15\right)$

Рис. 7. Расчет процесса стравливания воздуха и баллона

В расчетах на рисунках 6 и 7 было принято, что воздух был сухой – то есть опять же идеальный в каком-то смысле. Но реальный воздух всегда содержит влагу. Расчет параметров влажного воздуха описан в отдельной главе в книги: Бударин Н.Л., Мартынов А.В., Очков В.Ф., Шелгинский Е.А., Яворовский Ю.В. Установки для трансформации тепла и охлаждения: расчеты на SMath. Учебное пособие. Издательство Лань, 2024.

Заставлять школьников и студентов делать расчеты по законам идеального газа – это все равно, что заставлять их считать столбиком на листе бумаги. Да, студенты должны знать, что такое сложение и умножение (что такое идеальный газ и «с чем его едят, пардон, вдыхают»), но проводить такие арифметические действия они должны на электронных устройствах, а не на листочке бумаги, на арифмометре или логарифмической линейке[19]!

[19] Автор статьи помнит времена, когда в вузах активно сопротивлялись переходу от логарифмической линейки к электронным калькуляторам. Дескать, счёт на калькуляторе совсем отупляет студентов. То ли дело – логарифмическая линейка, где числа чувствуются даже тактильно. В наше время говорят, что функции по свойствам флюидов, описанные в этой статье, тоже отупляют студентов-теплотехников. То ли дело – таблицы и бумажные диаграммы с этими свойствами!

Конечно, нельзя игнорировать формулы и понятия, накопленные за несколько веков развития термодинамики. Но нельзя также игнорировать новые реалии, связанные с внедрением информационных технологий в учебный процесс. Здесь, как и везде нужно искать золотую середину – взвешенный подход без крайностей. Пока же в технической термодинамике наблюдается эта самая крайность – превалирование в учебниках законов идеального газа. Автор этой статьи поставил перед собой цель – написать новый взвешенный учебник. Данная статья – это изложение предисловия данной книги.

И последнее.

Сейчас все помешены на водородной энергетике, в частности на *водородовозах* – транспортных средствах, работающих на водороде[20] и имеющих в выхлопе только воду и ни грамма углекислого газа, окислов серы и прочего вредоносного. Так вот, бестопочный паровоз тоже в движении оставляет за собой только чистую воду. Читатель возразит в том плане, что удаленная-то котельная выбрасывает в атмосферу всякую гадость! Но и производители водорода нередко выбрасывает в атмосферу черти что!

Кстати, локомотив пневматической железной дороги – это уже совсем идеальное транспортное средство в плане экологии. Он выбрасывает в атмосферу лишь то, что получил из атмосферы. Если, конечно, забыть о приводе компрессора на удаленной компрессорной станции.

[20] Когда-то давно в советское время был проект установки на самолете Ту-155 баков с сжиженным водородом вместо керосина. Но! Авиационные катастрофы чаще всего происходят при взлете и посадке. Самолет с керосином может при аварии сжечь себя и своих пассажиров. Самолет же на водороде может прихватить при этом весь аэропорт!