

ДВИГАТЕЛЬ ВНЕШНЕГО УДАЛЁННОГО СГОРАНИЯ, или изучаем термодинамику по-новому!

Доктор технических наук, профессор **В.Ф. ОЧКОВ**,
кандидат технических наук, доцент **Н.В. ЕГОРОВА**,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой **Ю.В. ЩАЦКИХ**
(НИУ “МЭИ”)

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

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

В статье описаны расчёт и графическое отображение цикла бестопочного паровоза, приведшие к рассуждениям о современных проблемах теплотехнического образования, в частности, о преподавании технической термодинамики в вузах с привлечением современных информационных технологий. В частности, рассказано, как можно использовать физико-математическую программу SMath Studio с прикреплённым к ней пакетом WaterSteamPro для теплотехнических расчётов с построением диаграмм.

Все знают такое выражение: КПД – как у паровоза. Между тем, рабочий цикл такого, как говорили раньше, сухопутного паровоза – 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, уменьшающего нижнюю температуру “паровозного” цикла Карно. Ну и верхняя температура не особо высокая. Были попытки создания паровозов с конденсацией выходящего из цилиндров паровой машины пара (“мятого” пара) и возврата воды в котёл. Но это делалось, скорее, для экономии воды, а не топлива. Паровозы на станциях заправлялись не только углём, но и водой, требующей специальной водоподготовки, снижающей накипеобразование в паровом котле. А в засушливых районах Земли с водой были проблемы. Вспомним знаменитый Турксиб – детище первой советской пятилетки! Кроме того, выпускаемый из цилиндров паровоза пар направлялся в дымовую трубу и расходовался на создание тяги воздуха в топке. Паровозная труба – это своеобразный эжектор: некое конусное устройство, выполняющее функции дымососа. Был на паровозе и инжектор, подающий воду в паровой котёл (своеобразный питательный насос). В целом всё 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 поста-

ментах¹. Не редки и ретропоезда на паровозной тяге².

Но все попытки создания конденсационных паровозов и других усовершенствований на этих локомотивах прекратились с появлением тепловозов и электровозов. Заметим, что паровые машины паровозов изначально были оборудованы конденсаторами. Поэтому-то они не пытели как паровозы – не выпускали резко порции дыма из трубы³ 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 связке

¹ В Лондоне у вокзала “Виктория” есть музей, где собраны почти все экземпляры моделей английских паровозов. А в музее науки и техники города работает настоящая паровая машина, вырабатывающая электричество для этого научно-просветительского учреждения. Паровозы когда-то бегали в тоннелях лондонского метро. В местном музее транспорта есть соответствующая экспозиция.

² Немецкий учёный-теплотехник Ханс-Йохан Кречмар – автор одного из справочников свойств воды (“таблицы Вукаловича”), друг и коллега одного из авторов статьи, праздновал свой 60-летний юбилей на паровозном ретро поезде узкоколейки. Всё это происходило в окрестностях города Циттау на стыке границ Германии, Польши и Чехии. На подарке, который юбиляр получил от автора, был прорисован цикл паровой машины с изобарой в 60 бар! В другой свой приезд в Германию автор с этим приятелем катался по Эльбе на колёсном ретро-паровозе с паровой машиной. Во как!

³ Ещё одно “отверстие” для выпуска пара – паровозный или пароходный гудок. Вспомним поговорку: “Весь пар ушёл 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/1403178835808877912>). В фильме Эльдара Рязанова “Жестокий романс” по пьесе Островского “Бесприданница” есть любовная сцена с пароходным гудком: “Два коротких и один длинный!”

с электрогенераторами, питающими тяговые электродвигатели, которые крутят гребные винты. Паровой котёл (парогенератор) при этом может быть ядерным (атомоходы).

А вот про *бестопочный паровоз* (fireless locomotive – безогненный локомотив) не знают даже профессиональные теплотехники⁴. Спел-чекер текстового редактора Word, в среде которого писалась эта статья, тоже не знает такого прилагательного – “бестопочный” – и предлагает замену – “бестолочный”, то есть 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, убystряющую процесс приготовления пищи. Давление и температура в таком сосуде поднимались 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 ёмкость 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 Молье⁵) и др.) прежде всего рисуют две граничные кривые – синюю и красную, выходящие из критической точки (Cr). Здесь, как правило, упоминают и о тройной точке (второй конец синей и красной

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 в виду не бестопочный, а бестендерный паровоз – паровоз-танк, на котором ёмкости (танки) для жидкого топлива и воды располагались по бокам парового котла, а не в традиционном прицепном тендере. Есть легенда о том, что один из видных участников Гражданской войны в России – Сергей Лазо – был заживо сожжён в топке паровоза.

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

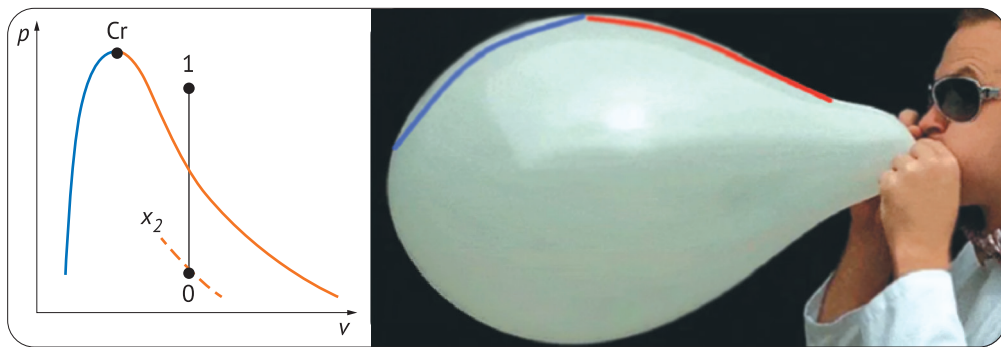


Рис. 1. “Надутая” p, v -диаграмма линий насыщения воды и водяного пара

линий⁶). Но на диаграммах (кроме p, T диаграммы) эта точка обычно раздваивается, что позволяет говорить не об одной, а о двух тройных точках, соединённых особой линией.

В подписи к рис. 1 стоит слово “надутая”. Что это означает?!

А это означает, что с диаграммой случился некий казус! Авторы затратили уйму времени, пытаясь построить её на компьютере. Возникло даже чувство, что программа SMath, в среде которой это делалось, сломалась. Программу переустановили⁷, но и это не помогло. Подозрение пало на графические особенности дисплея компьютера. Встал вопрос о переустановке и Windows... Но оказалось, что диаграмма-то строится, но её не было

видно, так как она представляла собой не горбатую кривую с критической точкой вверху (рис. 1), а прямой угол, скрытый за 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.

Левую диаграмму на рис. 2, можно сказать *надули* – как-то хитро изменили масштаб оси абсцисс, сделав его нелинейным для того, чтобы получить показанное 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 обманывая⁸ их, показывая нереальный график. Зачем это делается?

⁶ “Красная линия, которую нельзя переходить” – избитый пропагандистский штамп. В теплотехнике пересечение этой линии тоже чревато проблемами. Пар в турбине “переступает” её и становится влажным – проблематичным в отношении эрозии проточной части. Пар беспощадного паровоза, поступающий в цилиндры паровой машины, изначально влажный, что также влечёт 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.

⁸ Глагол “надувать” в смысле “обманывать” присутствует у Шолохова в “Поднятой целине” – деду Щукару цыган продал надутую пожилую лошадь (клячу) (https://vk.com/wall357070788_6186?ysclid=ix44i7e6fo763141952).

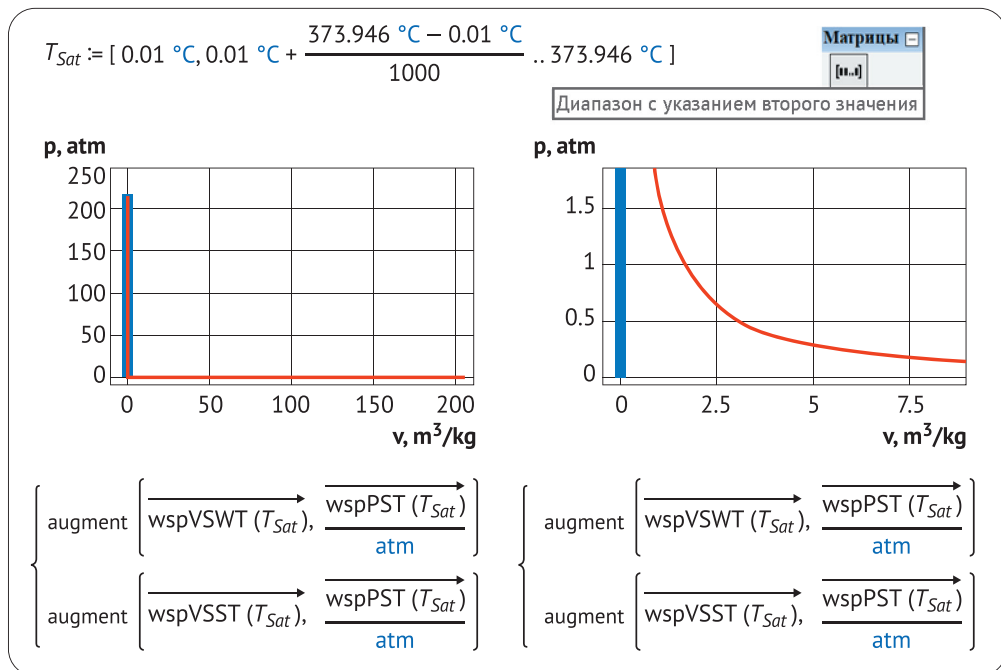


Рис. 2. Истинная p, v -диаграмма линий насыщения воды и водяного пара

Дело в том, что p, v -диаграмма очень востребована при описании процессов с идеальными газами, где нет линий фазовых переходов, а просто $p \cdot v = T$. Да-да! Нет в этой формуле никакой универсальной газовой постоянной R , по своей сути простого переводного коэффициента от кельвинов к истинным единицам температуры – см. рис. 5 и <http://tw.t.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 с именем `augment` (рис. 2). Вектор T_{Sat} заполняется по арифметической прогрессии значениями темпе-

ратуры – от температуры тройной точки до критической температуры (в данном примере это 1001 точка, которые сливаются в линию). Далее вступают в работу функции авторского пакета WaterSteamPro⁹ (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 функций – это оператор векторизации, заставляющий функции работать с каждым элементом вектора, а не с вектором в целом.

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>)

Изучение технической термодинамики начинают с идеальных газов. Потом (правда, не всегда) переходят к реальным флюидам – 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 объёма (массового или молярного¹⁰) на плотность – на обратную величину удельного объёма. Но при такой замене направление работы цикла тепловой машины изменится с привычного “по часовой стрелке” на непривычное – “против часовой стрелки”, то есть против устоявшихся канонов. Исправить это неудобство можно, перевернув по горизонтали ось абсцисс – см. рис. 4 и 5.

Вторая проблема, возникающая при переходе от удельного объёма 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 объёмом под интегралом¹¹. Заменить под ин-

тегралом удельный объём плотностью несложно. Сложность возникла тогда, когда пытались 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 расчёта интегралов. Нет в жизни счастья!

Работа с плотностью связана с таким уже не термодинамическим, а если так можно выразиться, лингвистическим нюансом – с отказом от греческой 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.

Немного поговорим о температуре.

Нет теплотехнического расчёта, в котором бы не присутствовала эта физическая величина.

Начнем издалека.

Один из авторов статьи никак не забудет одну школьную незаслуженную обиду. Спросил его учитель, чему равен синус 45 градусов. Автор не пытался тупо запомнить таблицу тригонометрических функций, а старался рассчитывать в уме нужные значения. Итак: угол в 45 градусов имеется 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, делённая на корень из двух! Учитель сказал: “Вот эту-то единицу

¹⁰ Молярный объём 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://tw.t.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://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/Tolstoy-Math-3.pdf>)

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 одного из авторов этой с записью: $T_0 = 18^\circ\text{C}$ на глаза одному маститому теплофизику. Он её пролистал и сказал: “Автор – безграмотный в термодинамике человек! Если в расчёт вводится температура по шкале Цельсия, то её заносят в переменную t . В переменную же T записывают абсолютную температуру в кельвинах! Я не буду дальше смотреть статью такого невежды!” Этот “маститый теплофизик” был тоже “надутым” (см. рис. 1). Увы, есть такие академики, члены-корреспонденты и прочие корифеи, 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 вводится в расчёт с любыми единицами (Цельсий, Фаренгейт, Ренкин, Реомюр¹² и т.д.), но хранится она в памяти компьютера в базовых единицах СИ. Что является базовой единицей температуры – это особая тема, которой мы ещё коснёмся.

Но оставим обиды в стороне и вернёмся к расчёту, показанному на рис. 3. Паровозов – простых

и бестопочных на сверхкритических параметрах, конечно, не было и нет. Но в нашем расчёте для наглядности мы примем, что пароводяную смесь нагревают до давления в 240 атмосфер¹³, что превышает критическое значение. Была когда-то реальная лаба¹⁴ на кафедре Теоретических основ теплотехники МЭИ, где работают авторы. Сейчас она существует в виде цифрового двойника – не кафедра, конечно¹⁵, а лабораторная работа. Брала толстостенную запаянную стеклянную ампулу, наполовину заполненную водой (скороварку – см. выше), помещали её в печь и нагревали, а затем охлаждали, наблюдая при этом, как ведёт себя линия раздела фаз. Теперь всё это можно видеть, увы, только на экране компьютера. С другой стороны, на экране можно наблюдать, как меняются параметры воды – в числах и на диаграммах. Конечно, самое лучшее решение – одновременная работа и с реальным объектом, и с его математической моделью, реализованной на компьютере. О такой модели и идёт речь в этой статье.

У котла-аккумулятора нашего сверхкритического бестопочного паровоза¹⁶ есть водомерное стекло,

¹³ Нагревают, конечно, не до определённого давления, а до определённой температуры. Но на паровозах обычно стояли манометры, а не термометры. Да и использовать здесь нужно не атмосферы, а мегапаскали. Но читаем статью дальше!

¹⁴ Так студенты называют лабораторные работы, исправляя тем самым этот лингвистический нонсенс. Словосочетание “лабораторная работа” – это масло масляное, если учесть, что работа по-английски labor.

¹⁵ А почему “конечно”? Существуют и цифровые кафедры. Кафедры как таковой нет, но занятия тем не менее ведутся!

¹⁶ Бензовоз возит бензин, молоковоз – молоко... А бестопочный паровоз возит на себе пар со степенью сухости, близкой к нулю (новый смысл термина паровоз!).

¹² Читаем у Чехова: “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...” Пересчёт на привычные цельсии сделать несложно, если вспомнить, что вода кипит при 80° градусах по Реомюру, а замерзает при нуле и Цельсия, и Реомюра.

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



Советский бестопочный паровоз

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рис. 3. Расчёт бестопочного паровоза

по которому можно наблюдать, как будет меняться уровень воды, вернее, когда он появится после начала движения такого сверхкритического паровоза.

Единицы измерения в компьютерных расчётах хороши и тем, что они выполняют функции комментариев, позволяющих легко понять, что хранит та или иная переменная. Тем не менее раскроем их: m – масса¹⁷, V (заглавная) – объём, v (прописная) – удельный объём, D (заглавная) – расход пара, d (прописная) –

плотность. Индексы у переменных такие: w – вода, s – водяной пар, 0 – в котёл залили кипятком, 1 – котёл закрыли и подняли в нём давление и температуру и 2 – бестендерный паровоз отработал своё и направляется в котельную для новой заправки теплом. Цикл замыкается!

Помогают сделать расчёт 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)

¹⁷ Одноимённая переменная хранит единицу длины метр, но это разные переменные, отличающиеся и цветом: чёрный цвет – масса, синий – метр.

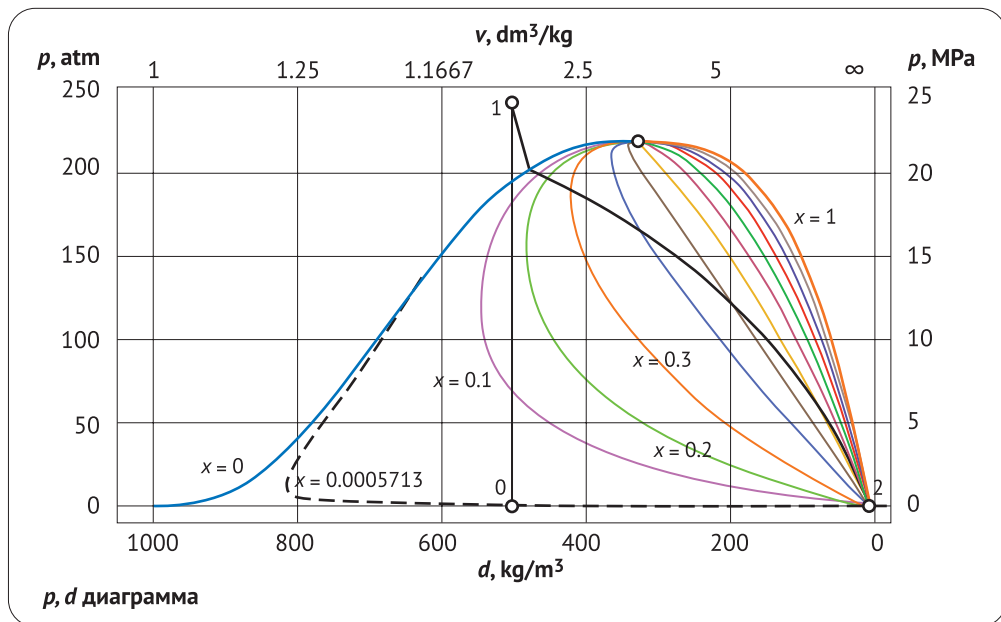


Рис. 4. *p, d*-диаграмма цикла бестопочного паровоза

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 четвёртый 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. И не только теплотехнические.

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 рис. 4 и 5 показаны: изохора 0–1, адиабата 1–2 (котёл-аккумулятор бестопочного паровоза покрыт толстым слоем теплоизоляции) и почти изобара-изотерма 2–0, а также изолинии постоянной сухости пара. У графиков имеется по паре осей – по горизонтали это плотность внизу и удельный объём вверх (нелинейная обратная шкала), а по вертикали – давление в атмосферах физических и в мега-

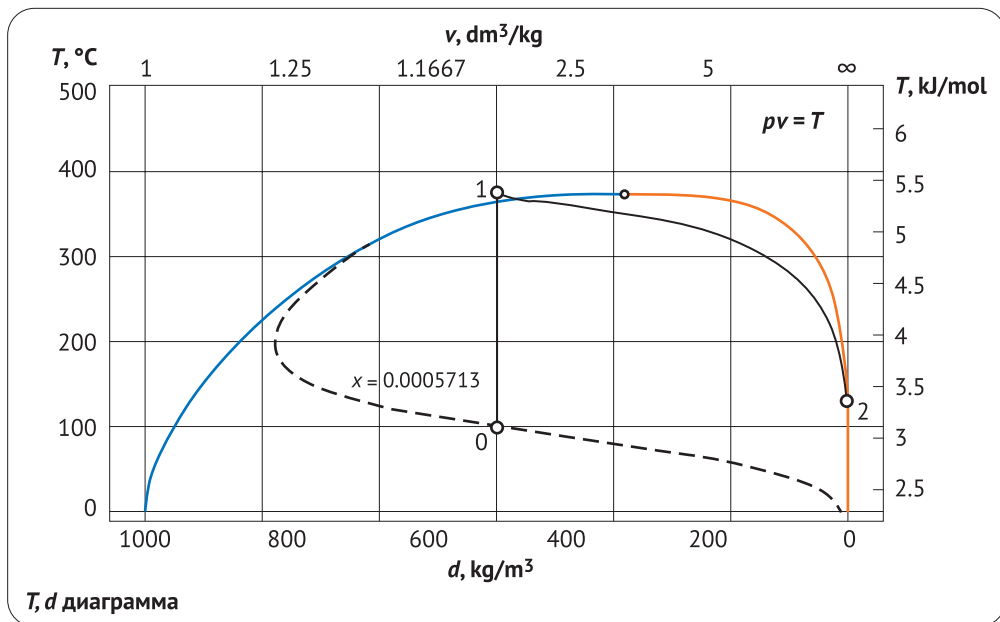


Рис. 5. T, d -диаграмма цикла бестопочного паровоза

паскалях¹⁸ (рис. 4), а температура (рис. 5) в градусах Цельсия и в единицах энергии, делённых на единицы количества вещества – kJ/mol. Настоящие физики, а не теплофизики, измеряют температуру единицами энергии – электронвольтами например, а не какими-то там выдуманными кельвинами (см. Очков В.Ф.,

¹⁸ А ещё есть атмосферы технические (килограмм силы на квадратный сантиметр) и бары (100000 Pa). Незаконные атмосферы удобнее законных мегапаскалей тем, что сразу видно, насколько давление больше атмосферного. Компьютерные пакеты с механизмом единиц измерения дружелюбны человеку и тем, что они позволяют использовать “удобные” единицы, а не те, которые предписаны кем-то. Помните историю с атмосферным давлением в сводках погоды, где пытались внедрить законные, но малопонятные гектопаскали вместо привычных миллиметров ртутного столба!? Ещё одна метеорологическая глупость в прогнозах погоды – скорость ветра даётся в метрах в секунду, а не в километрах в час. А ещё есть давление абсолютное и избыточное!

Орлов К.А. $p \cdot v = T$ или Как жить без кельвинов // Энергия: экономика, техника, экология. № 4 и 5. 2022 (<http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-4-2022-pt-T.pdf> и <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-OchkovVF.pdf>).

Отметим, что T, d -диаграмма визуально оказалась более “надутой”, чем p, d -диаграмма.

Кстати, бестопочный паровоз, да и просто обычный, могут 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 огнём – см. книгу “Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет” (под общ. ред. В.Ф. Очкова. 2-е изд., исправленное и дополненное. СПб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2015. – 336 с. <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html>).

$$\begin{aligned}
 p \cdot v &= R_m \cdot T & R_m &= 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \\
 p_0 &:= 1 \text{ atm} & T_0 &:= 18 \text{ }^\circ\text{C} \\
 \text{Воздух} & & k &:= 1.4 & M &:= 29 \frac{\text{g}}{\text{mol}} & V &:= 10 \text{ m}^3 \\
 v_0 &:= \frac{R_m \cdot T_0}{M \cdot p_0} = 0.8238 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} & m_0 &:= \frac{V}{v_0} = 12.14 \text{ kg} \\
 p_1 &:= 40 \text{ atm} \\
 v_1 &:= v_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = 0.05909 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} & m_1 &:= \frac{V}{v_1} = 162.2 \text{ kg} \\
 T_1 &:= \frac{M \cdot p_1 \cdot v_1}{R_m} = 562.2 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Рис. 6. Расчёт сжатия воздуха по законам идеального газа

В статье были упомянуты законы идеального газа. Так вот, в современных условиях, когда почти все более-менее сложные научно-технические расчёты выполняются сугубо на компьютере, студенты перестали понимать, зачем столько много времени на занятиях по технической термодинамике уделяется идеальным газам и приёмам работы с ними. Ведь есть программы, автоматически рассчитывающие свойства не только воды и водяного пара (см. выше), но и реальных газов и их смесей. КПД процесса изучения законов идеального газа становится “паровозным” – очень низким из-за отсутствия мотивации их изучения. Многие курсы лекций по технической термодинамике превращаются в занятия по истории этой научной дисциплины с упоминанием Гей-Люссака, Бойля, Мариотта и других учёных, когда-то давно изучавших газы.

Всё это, конечно, очень интересно, но полностью оторвано от реальной практики.

Конкретный пример. Котёл нашего бестопочного паровоза можно заполнить не водой под давлением в состоянии насыщения, а сжатым воздухом¹⁹. На рис. 6 показан расчёт массы и температуры сухого воздуха (молярная масса M , показатель адиабаты k): по закону идеального газа Клайперона–Менделеева “ $p \cdot v$ равняется эр тэ”. Воздух адиабатно накачивают в баллон объёмом 10 m^3 , повышая его давление с одной до 40 атмосфер. Масса воздуха в баллоне увеличивается с 12.14 до 169.2 кг, а температура – с 18 до 562.2 градусов по шкале Цельсия.

¹⁹ Были и такие экзотические воздуховозы, если так можно выразиться, с баллонами сжатого воздуха (https://ru.wikipedia.org/wiki/Пневматическая_железная_дорога).

Если этот расчёт сделать с опорой не на законы идеального газа, а на пакет WaterSteamPro, то ответ будет несколько иным – см. рис. 7. В расчёте принимается, что сухой воздух ($GS := \text{"Air"}$) адиабатно ($s_1 = s_0$) накачали в баллон ёмкостью 10 м^3 до абсолютного давления в 40 атмосфер. Используются функции пакета WaterSteamPro с буквой g – газы: $wspgVGSPT$ – удельный объём в зависимости от давления и температуры, $wspgSGSPT$ – удельная энтропия в зависимости от давления и температуры и $wspgTGPS$ – температура в зависимости от давления и удельной энтропии. Масса газа в баллоне при этом увеличилась с 12.12 кг до 174.5 кг, а температура поднялась с 18 до 536.1 °C .

Разные результаты расчётов на рис. 6 и 7 объяснить просто – показатель адиабаты для воздуха и других газов (см. расчёт на рис. 6) – никакая не константа, а величина, зависящая, в частности, от температуры. Что и показано в конце рис. 7: величина k – это отношение изобарной удельной теплоёмкости (c_p) к изохорной удельной теплоёмкости (c_v). Показатель адиабаты для воздуха близок к значению 1.4 только при низких (“комнатных”) температурах. Отход от детального изучения законов идеального газа можно оправдать и тем, что эти законы дают при расчётах не совсем верные результаты.

В расчёте на рис. 7 было принято, что воздух сухой – то есть опять же идеальный в каком-то смысле. Но реальный воздух всегда содержит влагу. Расчёт параметров влажного воздуха описан в отдельной главе: Бударин Н.Л., Мартынов А.В., Очков В.Ф.,

$$\begin{aligned}
 &GS := \text{"Air"} \\
 &T_0 := 18 \text{ °C} \quad p_0 := 1 \text{ atm} \quad V := 10 \text{ м}^3 \\
 &m_0 := \frac{V}{wspgVGSPT(GS, p_0, T_0)} = 12.12 \text{ kg} \\
 &s_0 := wspgSGSPT(GS, p_0, T_0) = 6.837 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \\
 &p_1 := 40 \text{ atm} \quad s_1 := s_0 \\
 &m_1 := \frac{V}{wspgVGSPT(GS, p_1, T_1)} = 174.5 \text{ kg} \\
 &T_1 := wspgTGPS(GS, p_1, s_1) = 536.1 \text{ °C} \\
 &\frac{wspgCPGST(GS, T_0)}{wspgCVGST(GS, T_0)} = 1.4 \\
 &\frac{wspgCPGST(GS, T_1)}{wspgCVGST(GS, T_1)} = 1.353
 \end{aligned}$$

Рис. 7. Расчёт сжатия воздуха с использованием пакета WaterSteamPro

Шелгинский Е.А., Яворовский Ю.В. Установки для трансформации тепла и охлаждения: расчёты на SMath. Учебное пособие. СПб.: Изд-во Лань, 2024.

Требовать от школьников и студентов делать расчёты по законам идеального газа – всё 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 линейке²⁰!

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. Авторы статьи поставили перед собой цель – написать новый взвешенный учебник. Настоящая статья – это изложение предисловия данной книги.

И последнее.

²⁰ Один из авторов статьи хорошо 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!

Сейчас все помешены на водородной энергетике, в частности на *водородовозах* – транспортных средствах, работающих на водороде²¹ 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 удалённая-то котельная выбрасывает в атмосферу всякую гадость! Но и производители водорода нередко выбрасывают в атмосферу чёрти что!

Кстати, локомотив пневматической железной дороги – 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 удалённой компрессорной станции.

²¹ Когда-то давно в советское время был проект установки на самолёте Ту-155 баков с сжиженным водородом вместо керосина. Но! Авиационные катастрофы чаще всего происходят при взлёте и посадке. Самолёт с керосином может при аварии сжечь себя и своих пассажиров. Самолёт же на водороде в состоянии прихватить при этом весь аэропорт!



**ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ
В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»**



КНИГИ



ЖУРНАЛЫ