

Двигатель внешнего удаленного сгорания Или Решаем задачи термодинамики по-новому!

Все знают такое выражение – КПД как у паровоза. Между тем, рабочий цикл 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, Тринклера, Брайтона, Ренкина и т.д. Невысокий КПД паровоза объясняется отсутствием у него конденсатора, снижающего нижнюю температуру «паровозного» цикла Карно. Ну и верхняя температура имеет не очень высокое значение. Были попытки создания паровозов с конденсацией, выходящего из цилиндров паровой машины пара и возврата конденсата в котел. Но это делалось скорее для экономии воды, а не топлива. Паровозы на станциях заправлялись не только углем, но и водой, требующей специальной водоподготовки, снижающей накипеобразование и коррозию в паровом котле. А в засушливых районах Земли с водой были проблемы. Вспомним знаменитый Турксиб – детище первой советской пятилетки – железную дорогу из Сибири в Среднюю Азию! 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 пароструйный инжектор, подающий воду в паровой котел (особый род питательного насоса без крутящихся частей). 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 постаментах¹. Не редки и ретропоезда на паровозной тяге².

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

² Немецкий ученый-теплотехник Ханс-Йохан Кречмар – автор одного из справочников по свойствам воды («таблиц Вукаловича»), друг и коллега второго автора данного учебного пособия праздновал свой 60-летний юбилей на паровозном ретро поезде узкоколейки. Все 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 колесном ретропароходе с паровой машиной. Во как!

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 трубчатыми конденсаторами, в которые поступала забортная вода, конденсирующая «мятый» пар. Поэтому-то паровозы не пыхтели как паровозы – не выпускали резко из трубы порции дыма³ в такт с ходом поршня паровой машины. В настоящее время такие *двигатели внешнего сгорания* на многих гражданских судах и военных кораблях остались, но это не цилиндры с поршнями, а паровые турбины, работающие в связке с электрогенераторами, питающими тяговые электродвигатели, которые в свою очередь крутят гребные винты. Паровой котел при этом может быть и ядерным (надводные и подводные атомоходы – см. главу 9). Паровые машины на паровозах с поршнями и цилиндрами крутили, как правило, не гребные винты, а гребные колеса. Альтернативное решение – установка двигателя внутреннего, а не внешнего сгорания – дизеля. Паровоз превращался в теплоход (дизель-электроход).

А вот про *бестопочный паровоз* (fireless locomotive) не знают даже профессиональные теплотехники⁴. Спел-чекер текстового редактора Word, в среде которого писалась эта книга, тоже не знаком с таким прилагательным – «бестопочный» и предлагает замену – «бестолочный», 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 и пороховых заводах, на лесопилках – везде, где была опасность взрыва или пожара от открытого огня, который вылетал из паровозной трубы. Об эффективности бестопочных паровозов особо не

³ Еще одно место для выпуска пара – это паровозный или паровозный гудок. Вспомним поговорку: «Весь пар ушел в гудок!» Эти устройства не просто подавали сигналы, а были своеобразными музыкальными инструментами, которые настраивали и которыми гордились. В фильме Эльдара Рязанова «Жестокий романс» по пьесе Островского «Бесприданница» есть любовная сцена с паровозным гудком: «Два коротких и один длинный!». Есть даже такая песня: «Паровозным гудком растревожена...» [2]. Паровозный выхлоп дал название повести Ивана Тургенева "Дым".

Нельзя здесь не вспомнить и паровозную трагическую песню со словами «Товарищ, я вахты не в силах стоять, – / Сказал кочегар кочегару, – / Огни в моих топках совсем прогорят, / В котлах не сдержать мне уж пару.» В музее транспорта швейцарского города Люцерн есть такой экспонат-тренажёр. В ящик без одной боковой стенки насыпано что-то около двухсот килограмм угля. Посетителям музея предлагается за одну минуту переложить лопатой этот уголь в другой такой же ящик. Этим имитируется работа паровозного кочегара. Не все укладываются в этот норматив. А кочегар кидает уголь в топку паровоза не одну минуту – он работает часами! Это был тяжелейший, если не сказать каторжный труд. Только на закате эры паровозов появились механические углеподатчики (стокеры).

⁴ Бестопочный паровоз звучит как сапоги всмятку. Авторы книги опросили два десятка своих коллег-теплотехников, но только один из них сказал, что что-то 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 прицепе – в тендере.

думали, руководствуясь пословицей (правилом): «*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. Толстостенная цилиндрическая ёмкость (котел-аккумулятор) примерно наполовину заполнялась водой, затем она плотно закрывалась и «ставилась на огонь» (внешнее сгорание – смотрим название главы и вспоминаем скороварку⁵, ускоряющую процесс приготовления пищи). Давление и температура в таком сосуде изохорически (при постоянном объёме) поднимались до тех пор, пока не... засвистит предохранительный клапан-свисток. 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 состояния рабочего тела такой тепловой машины. Эту инженерную конструкцию назвать тепловым двигателем будет не совсем корректно: топка-то отсутствует – она находится, как сейчас выражаются преподаватели и студенты, на «удалёнке».

Обычно для иллюстрации процесса изохорного нагрева пароводяной смеси используют диаграмму «давление-удельный объем» – p, v диаграмму (см. рис. 1). На таких и других подобных диаграммах (p, T – давление-температура, T, s – температура-энтропия, h, s – энтальпия-энтропия (диаграмма Моля⁶) прежде всего рисуют две граничные кривые – синюю и красную⁷, выходящие из критической точки (Cr). Здесь, как правило, упоминают и о тройной точке. Но на диаграммах (кроме p, T – диаграммы) эта точка обычно раздваивается,

⁵ Или автоклав – герметичный аппарат для различных операций, требующих нагрева под давлением выше атмосферного.

⁶ Мы огорчаемся из-за того, что за рубежом периодическую таблицу химических элементов забывают или не хотят называть таблицей Менделеева (1834-1904). У немецких теплотехников такая обида связана с h, s – диаграммой, которую вне Германии часто забывают называть диаграммой Рихарда Моля (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.

⁷ «Красная линия, которую нельзя переходить» – избитый пропагандистский штамп. В теплотехнике переход этой линии тоже чреват проблемами. Пар в турбине «переступает» эту линию и становится влажным – проблематичным в отношении эрозии проточной части турбины. 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. В паротурбинном цикле АЭС (см. главу 9) один влажный пар перегревают другим влажным паром.

что позволяет говорить не об одной, а о двух тройных точках, соединенных особой линией. Эту линию в зелёном цвете можно видеть, к примеру, на рис. 1.16 в главе 1, отмечающую изобару-изотерму на «нулевой» границе области формуляции IAPWS-95 по свойствам воды и водяного пара.

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

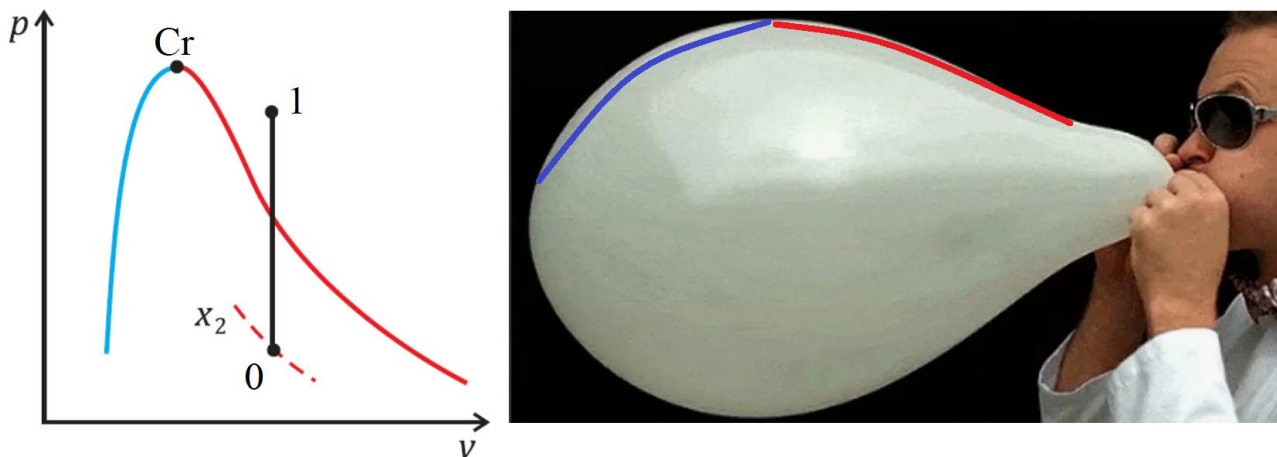
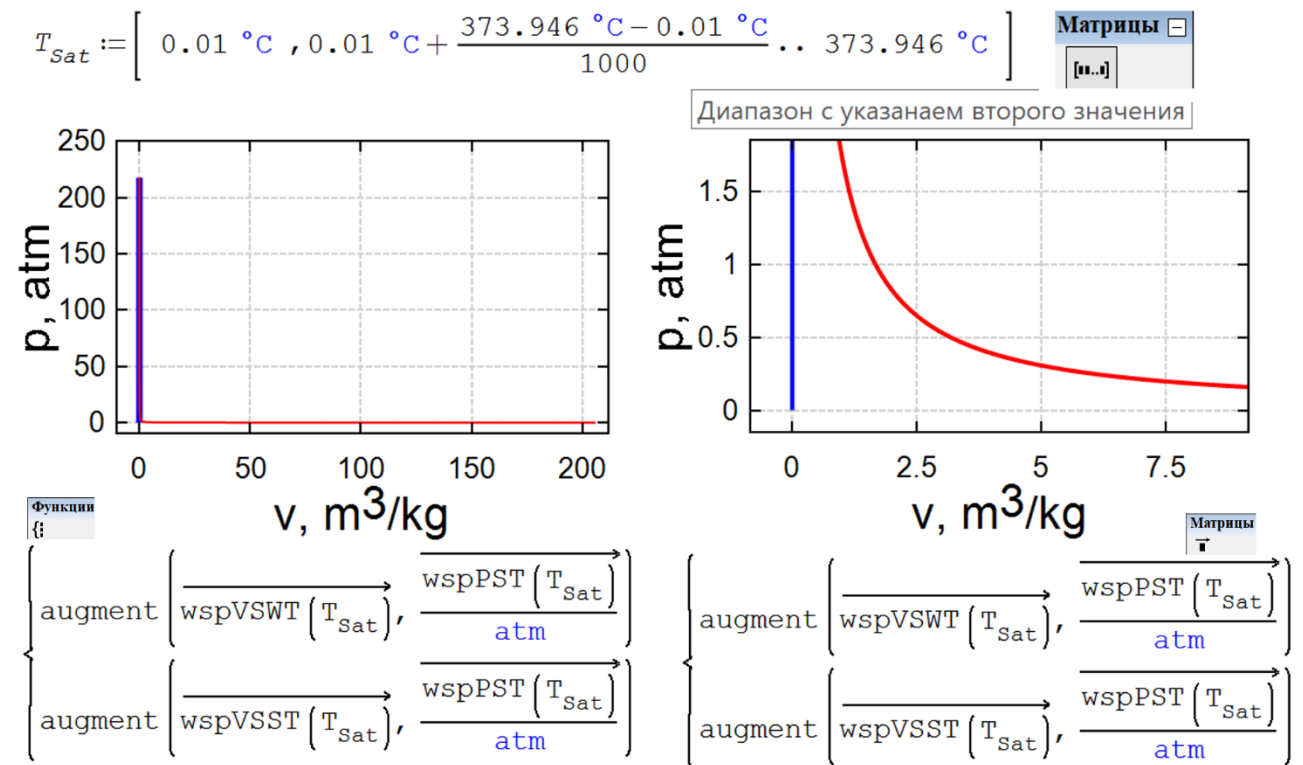


Рис. 1 «Надутая» p, v диаграмма линий насыщения воды и водяного пара

У авторов с такой диаграммой случилась казус! Они затратили уйму времени, пытаясь построить её на компьютере. Возникло даже чувство, что программа SMath, в среде которой это делалось, сломалась. Программу переустановили⁸, но и это не помогло. Подозрение пало на графические особенности дисплея компьютера. Встал вопрос о переустановки и самой операционной системы Windows... Но оказалось, что диаграмма-то строится, но её не видно из-за того, что она представляла собой не горбатую («надутую») кривую с критической точкой вверху и с тройными точками по бокам (рис. 1), а почти прямой угол, маскирующийся за линиями координатной сетки (см. левый график на рис. 2). Синяя линия (насыщение по воде) взмывает вверх от тройной точки до критической точки (вода почти не сжимаема), а продолжающая её красная линия (насыщение по водяному пару) отвесно падает вниз и затем резко сворачивает на горизонтальный участок ко второй критической точке. Увеличение диаграммы (zoom – правый график на рис. 2) показывает, что происходит вблизи нуля этого графика.

⁸ Напоминаем, что это бесплатно делается за пару минут с сайта www.smath.com.

Рис. 2 Истинная (не надутая) p, v диаграмма линий насыщения воды и водяного пара

Левую диаграмму на рис. 2, можно сказать, *надули* – как-то так хитро изменили масштабы осей, сделав их нелинейными для того, чтобы получить то, что показанное на рис. 1. Вышел некий качественный график⁹, который кочует из одной книги по термодинамике в другую... Заодно «надувают» не только график, но и студентов, невольно обманывая¹⁰ их, показывая нереальный график. Авторы нисколько не хотят бросить камень в огород нескольких поколений термодинамиков, но почему же так происходит?

Дело в том, что p, v диаграмма очень востребована при описании тепловых процессов с газами – идеальными и реальными, где нет линий фазовых переходов, а просто $p v = R$

⁹ Если студент на занятии по математике будет строить графики так, как мы строим их в этой книге (проставляем много-много точек и соединяем их отрезками прямых, сливающихся в кривую), то преподаватель выгонит такого студента из аудитории и будет топтать при этом ногами и улюлюкать ему вослед. Качественное, а не количественное построение графика подразумевает фиксацию на нем особых точек и воображаемых вспомогательных линий (нули, минимумы-максимумы, разрывы, асимптоты и прочее), проведение через них (около них) самого графика. Что и сделано на рис. В1.

¹⁰ Глагол «надувать» в смысле «обманывать» красочно описан у Шолохова в «Поднятой целине» – деду Щукарю цыган продал надутую пожилую лошадь (клячу [3]).

T . (Есть попытки и другой записи этого закона, где универсальную газовую постоянную считается переводным коэффициентом единиц температуры – см. рис. 5 и [1]).

График в среде SMath строится довольно просто – см. сноску 9. 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 от значения температуры тройной точки до значения критической температуры (в данном примере это 1001 точка, которые сливаются в линию). Далее вступают в работу функции авторского пакета WaterSteamPro (см. www.wsp.ru [4] и главу 1), формирующие три вектора – значения давления (P) насыщения (`wspPST`), удельного объема (V) воды на линии насыщения (`wspVSWT`) и удельного объема насыщенного водяного пара (`wspV SST`). 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.

Изучение технической термодинамики начинают с идеальных газов. Потом, правда, далеко не всегда) переходят к реальным *флюидам* – к воде и водяному пару, например, прихватив при этом «старую, добрую» p, v – диаграмму. Здесь и возникает феномен «надутости» диаграммы.

Эта проблема решается просто – заменой удельного объема (массового или молярного¹¹) на плотность – на обратную величину от удельного объема. Но при такой замене направление работы цикла тепловых машин изменится с привычного «по часовой стрелке» на непривычное – «против часовой стрелки», т.е. против устоявшегося правила¹². Исправить это несоответствие можно, перевернув по горизонтали ось абсцисс – см. рис. 4 и 5. Для этого в меню настройки графика достаточно в окне максимального значения записать минимальное значение (0), а в окне минимального значения – максимальное значение (1000 килограмм на

¹¹ 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 [6].

¹² Направление против часовой стрелки имеет место при иллюстрации работы холодильной машины, например (см. главу 7). В главе 3 читатель может увидеть некую экзотическую диаграмму цикла Отто (рис. 3.7) с восьмеркой – направление процесса меняется с "по часовой стрелке – тепловая машина" на "против часовой стрелки – холодильная машина".

метр кубический, если говорить о плотности воды). Это недокументированный прием! Но и вся наша жизнь в каком-то смысле тоже чей-то недокументированный эксперимент! Кстати, авторы тоже слегка «надувают», обманывают читателя, пририсовывая на графиках в рисунках 4 и 5 значения удельного объема на верхней оси абсцисс. Средствами настройки графика этого не сделаешь. Приходится «фотошопить» – помещать изображение графика в среду графического редактора Paint, например, и подправлять его.

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 интегралом¹³. Заменить под интегралом удельный объем на плотность несложно. Сложность возникала тогда, 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 новая, связанная уже с особенностями численных методов расчёта интегралов.

Работа с плотностью связана не с термодинамическим, а с терминологическим 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 (см главы 1 и 2) уже давно присутствует буква D (density), обозначающая плотность.

И ещё. Формуляция IAPWS-95 по свойствам воды и водяного пара (см. главу 1) в качестве второго входного параметра имеет плотность, а не удельный массовый объем. Первый параметр – это температура.

Важное примечание. Построение цикла в диаграмме «давление -удельный объём», а не в диаграмме «давление-плотность» позволяет проанализировать работу в каждом процессе и в цикле в целом. Для воды цикл в левой части диаграммы не строится (см. левый график на рис. 2), поскольку работа сжатия в насосе несоизмерима мала по сравнению с работой расширения в турбине. Авторы, конечно, можно упрекнуть в том, что они перекраивают термодинамические циклы для красивой картинки: учебное пособие должно помочь

¹³ В романе «Анна Каренина» Л.Н. Толстого Константин Левин (alter-ego Толстого) читал книгу Тиндаля о теплоте и рассуждал об интегралах [7].

студентам освоить и без того не простую дисциплину «Техническая термодинамика», а не окончательно запутать их. Но авторы надеются, что этого не случится.

Немного скажем о температуре. Нет теплотехнического расчета, в котором бы не присутствовала эта физическая величина.

Начнем издалека.

Второй автор книги никак не может забыть одну школьную незаслуженную обиду. Спросил его учитель, чему равен синус 45 градусов. Автор не пытался тупо запомнить таблицу тригонометрических функций, как обычно это делают школьники, 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. Синус – это отношение длины противолежащего катета к длине гипотенузы. Ответ был таков: синус 45 градусов – это единица, деленная на корень из двух! Но учитель не похвалил ученика, а сказал: «Вот эту-то единицу я тебе и поставлю в журнал и дневник! 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 второго автора этой книги с записью $T := 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глаза одному маститому теплофизику. Он пролистал её и сказал: «Автор – безграмотный в термодинамике человек! Если в расчет вводится температура по шкале Цельсия, то под её хранение выделяют 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. Но сами они учиться не хотят или не могут. Учиться, например, вести расчеты по-новому – с помощью современных компьютерных программ с их нюансами, один из которых – это работа с температурой.

Итак! Запомним раз и навсегда! В физико-математических пакетах с поддержкой единиц измерения, к коим относится и SMath, температура вводится в расчет с любыми

Глава 1

единицами и по любым шкалам (Цельсий, Фаренгейт, Ренкин, Реомюр¹⁴ и т.д.), но хранится она в памяти компьютера в базовых единицах СИ. Отказ от двоякости в маркировке температуры (t и T) высвобождает переменную t под хранения значения времени (time) – см. предпоследнюю строку на рис. 3. В термодинамике под это значение обычно резервируют греческую букву τ , что диссонирует с нормами общей физики, где t это time – время. Кроме того, многие языки программирования не работают с греческими буквами в первую очередь из-за того, что можно запутаться в буквах-двойниках, например в P – латинская (английская) буква пи заглавная и греческая заглавная буква P (rho). А есть ещё и русская буква эр заглавная.

Правда, утверждение о том, что термодинамика – это часть физики, а техническая термодинамика для теплотехников – это адаптированная часть термодинамики, многие подвергают критике и считают, что техническая термодинамика – это самостоятельная и научная, и учебная дисциплина со своей системой обозначения величин.

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

Паровозов – простых и бестопочных на сверхкритических параметрах, конечно, не было и нет. Но в нашем расчете для наглядности мы примем, что пароводяную смесь в нашей «скороварке» (в автоклаве) нагревают внешним паром так, что давление при этом поднимается до 240 атмосфер¹⁵, что превышает критическое значение (217.8 атмосфер). Была когда-то реальная лаба¹⁶ на кафедре Теоретических основ теплотехники МЭИ, где работают авторы. Сейчас она существует в виде цифрового двойника – не кафедра, конечно¹⁷, а лабораторная работа. Брали несколько толстостенных запаянных стеклянных ампул, заполненных разным количеством воды, помещали их в печь, нагревали, а затем охлаждали,

¹⁴ Читаем у Чехова: «Земля изображала из себя пекло. Послеобеденное солнце жгло с таким усердием, что даже Реомюр, висевший в кабинете акцизного, потерялся: дошел до 35,8° и в нерешимости остановился...». Пересчет на привычную шкалу Цельсия сделать несложно, если вспомнить, что вода кипит при 80 градусах по Реомюру, а замерзает при нуле и по Цельсию, и по Реомюру. Были комнатные термометры с такими двумя шкалами.

¹⁵ Нагревают, конечно, не до определенного давления, а до определенной температуры. Но на паровозах обычно стояли манометры, а не термометры. Да и использовать здесь нужно не атмосферы, а мегапаскалы. Но, читаем книгу дальше!

¹⁶ Просим простить читателя за такое жаргонное слово. Так студенты называют лабораторные работы, исправляя тем самым этот лингвистический нонсенс. Словосочетание «лабораторная работа» — это масло масляное, если принять во внимание, что работа по-английски labor.

¹⁷ А почему «конечно»? Существуют и цифровые кафедры. Кафедры как таковой нет, но занятия на ней, тем не менее, ведутся! Остается только изобрести цифрового студента, и все заработает без участия живых людей.

наблюдая при этом, как ведут себя линии раздела фаз в разных ампулах¹⁸. Объем ампул был одинаков, но разным был начальный объем воды. Теперь все это можно видеть, увы, только на экране компьютера. С другой стороны, на экране компьютера можно видеть, как меняются параметры воды – в числах и на диаграммах – см. Дивертисмент 3 в конце главы. Конечно, самое лучшее решение – это одновременная работа и с реальным объектом, и с его математической моделью, реализованной на компьютере. О такой модели «скороварки-автоклава» и идет речь в данной главе книги.

У котла-аккумулятора нашего бестопочного паровоза¹⁹ есть водомерное стекло, по которому можно наблюдать, как будет меняться уровень воды при движении этого транспортного средства.

Единицы измерения в компьютерных расчетах хороши и тем, что они побочно выполняют функции комментариев, позволяющих легко понять, что хранит та или иная переменная. Тем не менее, раскроем их: m – это масса²⁰, V (заглавная) – объем, v (прописная) – удельный массовый объем, D (заглавная) – расход пара, d (прописная) – плотность. Индексы у переменных такие: w – вода, s – водяной пар, 0 – в котел залили кипятком, 1 – котел закрыли и подняли в нем давление и температуру и 2 – бестопочный паровоз отработал своё и направляется в котельную для новой заправки водой и теплом. Цикл замыкается!

Помогают сделать расчет такие функции уже упомянутого авторского 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

¹⁸ Подобные опыты, но не с водой, а с углекислым газом проводил ирландский физико-химик Томас Эндрюс (19.12.1813 — 26.11.1885). Мы к ним вернемся в главе 12.

¹⁹ Бензовоз возит бензин, молоковоз – молоко... А бестопочный паровоз возит на себе пар со степенью сухости близкой к нулю (новый смысл термина паровоз!).

²⁰ Одноименная переменная хранит единицу длины метр, но это разные переменные, отличающиеся и цветом: черный цвет – масса, синий – метр.

Глава 1

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 на компьютере довольно сложные задачи. И не только теплотехнические. Ещё одна уместная поговорка: "Дайте мне создать функцию пользователя – и я решу поставленную задачу!".

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



Советский бестопочный паровоз

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

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

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

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

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

$$d_0 := \frac{m_0}{V} = 500.3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad x_0 := \frac{m_{s0}}{m_0} = 0.0005713$$

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

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

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

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

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 постоянной сухости пара²¹. У графиков имеется по паре осей – по горизонтали это плотность внизу и удельный объем вверху (нелинейная обратная шкала), а по вертикали – давление в атмосферах физических и в мегапаскалях²² (рис. 4), а температура (рис. 5) в градусах Цельсиях и в единицах энергии, деленных на единицы количества вещества – kJ/mol. Настоящие физики, а не теплофизики измеряют температуру единицами энергии – электронвольтами, например, а не какими-то там выдуманными кельвинами [1].

$$T_{cr} := \text{CoolProp_Props} ("T_{crit}", "", 0, "", 1, \text{wm}) = 373.946 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{tr} := \text{CoolProp_Props} ("T_{triple}", "", 0, "", 1, \text{wm}) = 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_{cr} := \text{CoolProp_Props} ("P_{crit}", "", 0, "", 1, \text{wm}) = 22.064 \text{ MPa}$$

$$P_{tr} := 611 \text{ Pa}$$

$$T_{sat} := \left[T_{tr}, T_{tr} + \frac{T_{cr} - T_{tr}}{1000} \cdot (T_{cr}) \right] +$$

$$P_{sat} := \overrightarrow{\text{wspPST}}(T_{sat}) \quad d_{satW} := \overrightarrow{\text{wspDSWT}}(T_{sat})$$

$$d_{sats} := \overrightarrow{\text{wspDSST}}(T_{sat}) \quad d_x := \overrightarrow{\text{wspDSTX}}(T_{sat}, x_0)$$

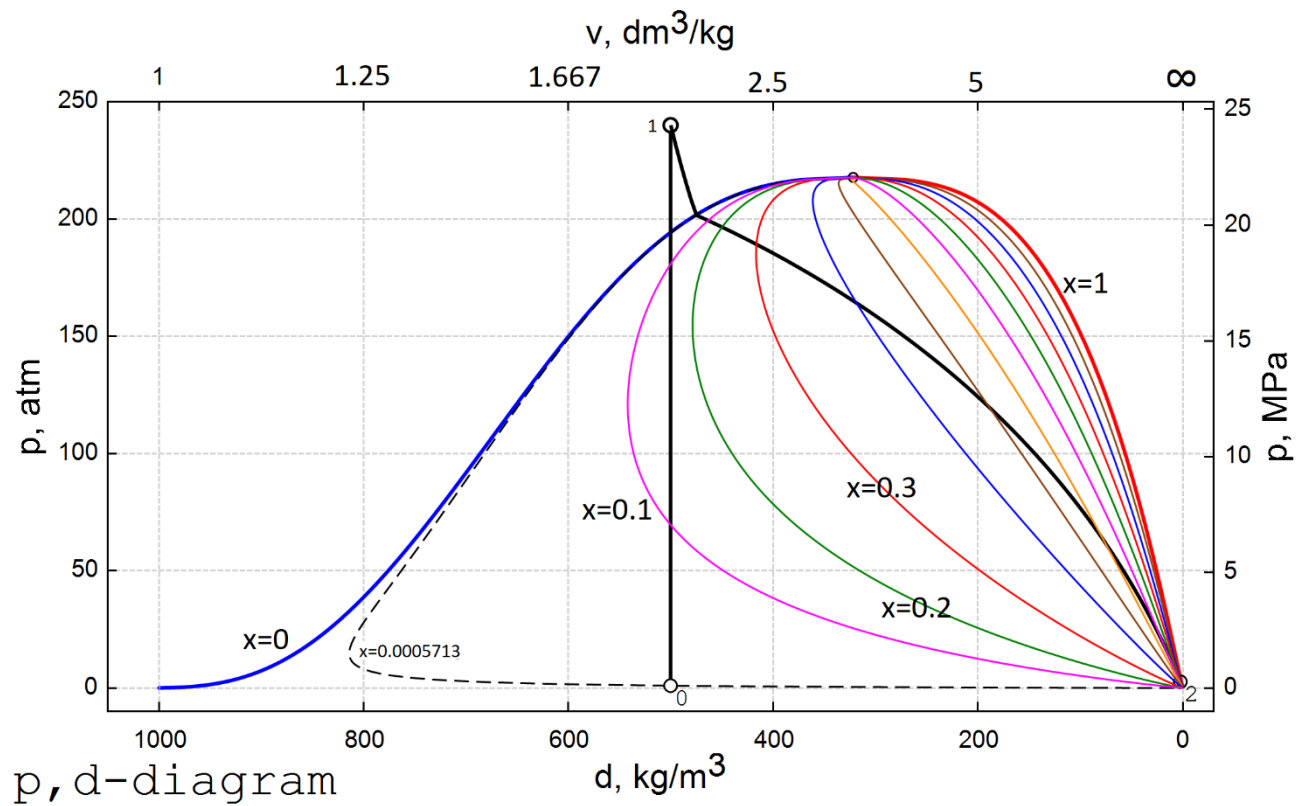
$$d_{12} := \overrightarrow{\text{CoolProp_Props}}("D", "P", P, "H", h_1, \text{wm})$$

²¹ Они ведут себя довольно интересно. При снижении сухости пара (x) от единицы (красная кривая) до нуля (синяя кривая) линия постоянной сухости постепенно прижимается к синей линии, но затем сворачивает к критической точке водяного пара. При этом все линии, как и положено, исходят из критической точки.

²² А ещё есть атмосферы технические (килограмм силы на квадратный сантиметр) и бары (100 000 Pa). Незаконные атмосферы удобнее законных мегапаскалей тем, что сразу можно оценить, во сколько раз давление больше атмосферного. Компьютерные пакеты с механизмом единиц измерения дружелюбны человеку и тем, что они позволяют использовать «удобные» единицы, а не те, какие предписаны кем-то. Помните историю с атмосферным давлением в сводках погоды, где пытались внедрить законные, но малопонятные гектопаскали вместо привычных миллиметров ртутного столба!? Еще одна метрологическая нелепость в прогнозах погоды – скорость ветра даётся в метрах в секунду, а не в километрах в час. А ещё есть давление абсолютное и избыточное!

$$p, d\text{-}diagram := \left[\begin{array}{l} \left[\text{augment} \left(d_{SatW}, \frac{p_{Sat}}{\text{atm}} \right) \text{"Насыщение по воде"} \right]_1 \\ \left[\text{augment} \left(d_{SatS}, \frac{p_{Sat}}{\text{atm}} \right) \text{"Насыщение по пару"} \right]_1 \\ \left[\text{augment} \left(d_x, \frac{p_{Sat}}{\text{atm}} \right) \text{"Постоянная влажность"} \right]_1 \\ \left[\left[322 \frac{p_{cr}}{\text{atm}} \text{"o"} 5 \text{"black"} \right] \text{"Критическая точка"} \right]_1 \\ \left[\begin{array}{l} d_0 \frac{p_0}{\text{atm}} \text{"0"} 5 \text{"black"} \\ d_0 \frac{p_1}{\text{atm}} \text{"1"} 5 \text{"black"} \end{array} \right] \\ \left[\left[\begin{array}{l} d_0 \frac{p_0}{\text{atm}} \\ d_0 \frac{p_1}{\text{atm}} \end{array} \right] \text{"Линия 0-1"} \right]_1 \\ \left[\text{augment} \left(d_{12}, \frac{p}{\text{atm}} \right) \text{"Линия 1-2"} \right]_1 \\ \left[d_{12} \text{length}(d_{12}) \frac{p \text{length}(p)}{\text{atm}} \text{"2"} 5 \text{"black"} \right] \\ \left[d_{12} \text{length}(d_{12}) \frac{p \text{length}(p)}{\text{atm}} \text{"o"} 7 \text{"black"} \right] \end{array} \right]$$

$$Plot := \left\{ \begin{array}{l} \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.9 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.8 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.7 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.6 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.5 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.4 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.3 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.2 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.1 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.05 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.025 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \\ \text{augment} \left(\overrightarrow{\text{wspDSTX} \left(T_{Sat}, 0.01 \right)}, \frac{p_{Sat}}{atm} \right) \end{array} \right.$$

Рис. 4 p, d диаграмма цикла бестопочного паровоза

Адиабата 2-3 оказалась с неким изломом, который противоречит утверждению о том, что природа не терпит (острых) углов. Но здесь мы, по первым, имеем дело с фазовым переходом и, во-вторых и главных, не с природой, а с её частным цифровым двойником.

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

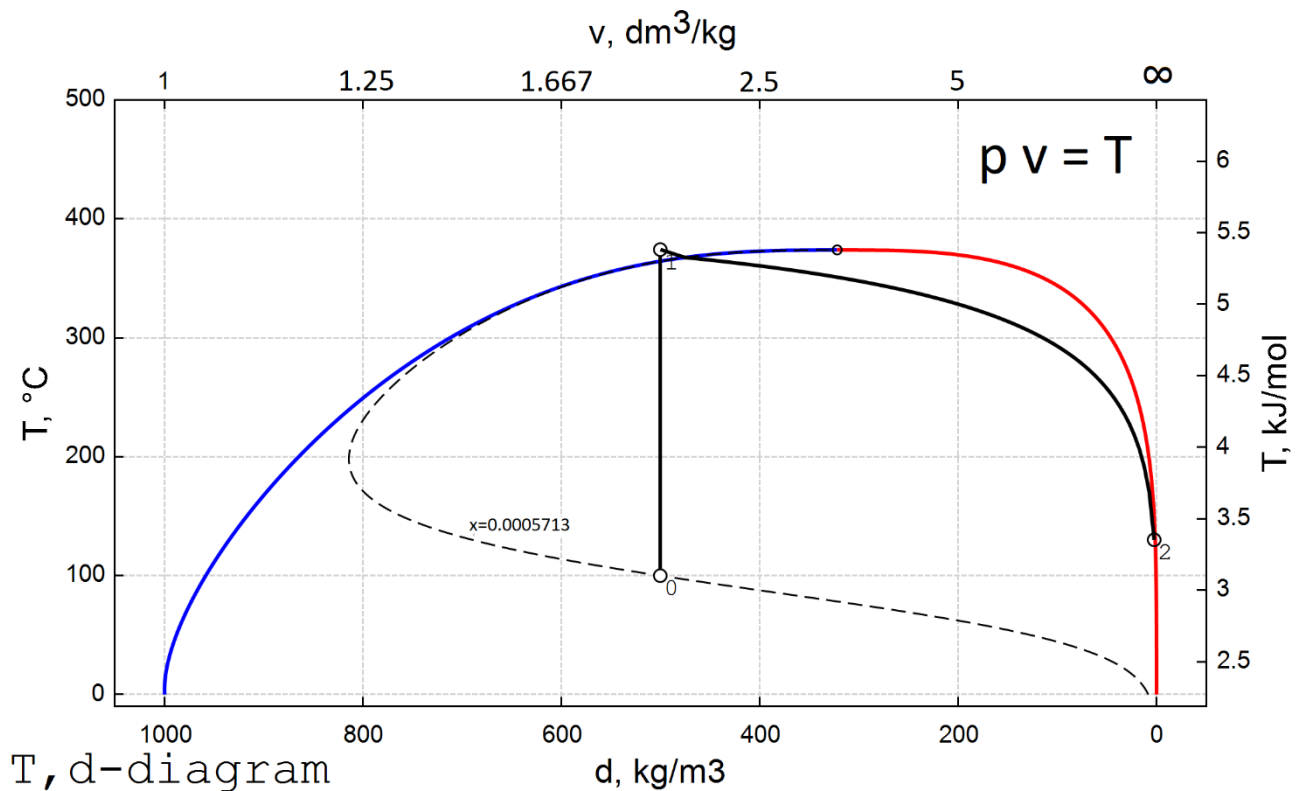


Рис. 5 T, d диаграмма цикла бестопочного паровоза

Кстати, бестопочный паровоз, да и простой обычный паровоз может в ряде случаев выполнять функции пожарного поезда – подъезжать на железнодорожной станции к очагу возгорания и тушить пожар паровоздушной смесью. Есть такой патентованный эффективный способ борьбы с огнем – см. [5].

3. Предисловии были упомянуты законы идеального газа. Так вот, в современных условиях, когда почти все более-менее сложные научно-технические расчеты выполняются сугубо на компьютерах, студенты перестали понимать, зачем столько много времени на занятиях по технической термодинамике 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 и их смесей. КПД процесса изучения термодинамики идеального газа становится «паровозным» – очень низким из-за отсутствия мотивации к изучению всего этого. Многие курсы лекций по технической термодинамике превращаются в занятия по истории этой научной дисциплины с упоминанием Гей-Люсака,

Бойля, Мариотта и других ученых, когда-то давно изучавших газы. Все это, конечно, очень интересно, но почти полностью оторвано от реальной практики термодинамических расчетов.

Конкретный пример. Котел нашего бестопочного паровоза можно заполнить не водой под давлением в состоянии насыщения, а сжатым воздухом²³. На рисунке 6 показан расчет массы и температуры сухого воздуха (молярная масса M , показатель адиабаты k) по закону идеального газа Клайперона-Менделеева «пэ вэ равняется эр тэ» или просто «пэ вэ равняется тэ» [1]. Воздух адиабатно накачивают в баллон, объёмом 10 м^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.

$$\begin{aligned}
 p \cdot v &= R_m \cdot T & R_m &= 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \\
 T_0 &:= 18 \text{ }^\circ\text{C} & p_0 &:= 1 \text{ atm} \\
 \text{Воздух} & & M &:= 29 \frac{\text{g}}{\text{mol}} & k &:= 1.4 & V &:= 10 \text{ м}^3 \\
 v_0 &:= \frac{R_m \cdot T_0}{M \cdot p_0} = 0.8238 \frac{\text{м}^3}{\text{kg}} & m_0 &:= \frac{V}{v_0} = 12.14 \text{ kg} \\
 p_1 &:= 40 \text{ atm} \\
 v_1 &:= v_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = 0.05909 \frac{\text{м}^3}{\text{kg}} & m_1 &:= \frac{V}{v_1} = 169.2 \text{ kg} \\
 T_1 &:= \frac{M \cdot p_1 \cdot v_1}{R_m} = 562.2 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Рис. 6 Расчет сжатия воздуха по законам идеального газа

Если этот расчет сделать с опорой не на законы идеального газа, а на пакет WaterSteamPro, то ответ будет несколько иным – см. рис. 7. В расчете 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

²³ Были и такие экзотические воздуховозы, если так можно выразиться, с баллонами сжатого воздуха [8].

Глава 1

g – газы: wspgVGSPT – удельный объём в зависимости от давления и температуры, wspgSGSPT – удельная энтропия в зависимости от давления и температуры и wspgTGSPS – температура в зависимости от давления и удельной энтропии, а также. Масса газа в баллоне при этом увеличилась с 12.12 кг до 174.5 кг, а температура поднялась с 18 до 536.1 °C.

$GS := \text{"Air"}$

$T_0 := 18 \text{ } ^\circ\text{C}$ $p_0 := 1 \text{ atm}$ $V := 10 \text{ m}^3$

$m_0 := \frac{V}{\text{wspgVGSPT}(GS, p_0, T_0)} = 12.12 \text{ kg}$

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

$p_1 := 40 \text{ atm}$ $s_1 := s_0$

$m_1 := \frac{V}{\text{wspgVGSPT}(GS, p_1, T_1)} = 174.5 \text{ kg}$

$T_1 := \text{wspgTGSPS}(GS, p_1, s_1) = 536.1 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\frac{\text{wspgCPGST}(GS, T_0)}{\text{wspgCVGST}(GS, T_0)} = 1.4$

$\frac{\text{wspgCPGST}(GS, T_1)}{\text{wspgCVGST}(GS, T_1)} = 1.353$

Рис. 7. Расчет сжатия воздуха с использования пакета WaterSteamPro

Разные результаты расчетов на рис. 6 и 7 объяснить просто – показатель адиабаты для воздуха и других газов (см. расчет на рис. 6) – это 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 расчетах неверный результат.

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 главе 5 и в [9].

Формулы, истекающие из закона идеального газа, – см. например, формулу со степенью $1/k$ для расчета значения v_1 на рис. 6, многим 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. главы 1 и 2. 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 линейке²⁴! Ещё одна математическая аналогия. В термодинамике широко используются производные и интегралы для описания, например, свойств теплоносителей и рабочих тел, а также процессов в тепловых машинах. Современные студенты, которые должны знать, что это такое, уже не могут аналитически дифференцировать и интегрировать даже простейшие функции. Зачем, спрашивают они это делать, если под рукой имеются компьютерные средства не только символьной, но и численной математики. Это же касается и решения уравнений – см. рис. 14 ниже.

Конечно, нельзя игнорировать формулы и понятия, накопленные за несколько веков развития термодинамики (и математики). Но нельзя также игнорировать новые реалии, связанные с внедрением информационных технологий. Здесь, как и везде нужно искать

²⁴ Второй автор книги 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 тоже довольно часто преподаватели говорят, что функции по свойствам флюидов, описанные в этой книге, тоже отупляют студентов-теплотехников. То ли дело – таблицы и бумажные диаграммы с этими свойствами, где всё чувствуется даже тактильно, когда водят пальцем по бумаге!

золотую середину – взвешенный подход без крайностей. Пока же в учебных материалах по технической термодинамике наблюдается эта самая крайность – превалирование в учебниках законов идеального газа и эмпирики при описании реальных газов – неких кубических уравнений, например. Авторы этой книги поставил перед собой цель – написать новое взвешенное учебное пособие. Под взвешенностью авторы понимают учёт и классической термодинамики, и того нового, что приносят в нашу жизнь новые информационные технологии.

В сноске 9 было отмечен разный подход к рисованию графиков человеком без компьютера и человеком с компьютером. Давайте порассуждаем дальше в этом направлении! Многие люди искренне удивляются, зачем их в школе учили арифметическим действиям с простыми (обыкновенными) дробями, когда почти у каждого школьника и студента имеется электронный калькулятор, если не в виде отдельного карманного устройства, то в виде приложения в смартфоне. Та вот, многие опытные педагоги и методисты вполне обосновано полагают, что если ребенка в самом начале его математического образования не научить работать с простыми дробями, а сразу начать с десятичных (калькуляторных) дробей, то изучение математики пойдет вкривь и вкось. Если вообще пойдет!

Примерно такое же можно сказать и о термодинамике. Если не изучать законы идеального газа (рис. 6), а сразу перейти к компьютерным инструментам обращения с рабочими телами и теплоносителями (рис. 7), то... см. выше. Эти рассуждения можно продолжить. Если студент не поработает с бумажными таблицами и диаграммами состояний рабочих тел и теплоносителей (см. рис. 8.1 в главе 8), а сразу станет использовать пакет WaterSteamPro, то... см. выше.

Кстати, простые дроби самым неожиданным образом возникают в термодинамике идеальных газов. На рисунке 8 показано, как задаются параметры идеального одно- и двухатомного газа с опорой на универсальную газовую постоянную, коэффициенты при которой не десятичные, а именно простые дроби: $5/2$, $3/2$ и $7/2$.

Изобарная теплоемкость одноатомных газов

$$c_p := \frac{5}{2} R_m = 20.79 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

Изохорная теплоемкость одноатомных газов

$$c_v := \frac{3}{2} R_m = 12.47 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

Показатель адиабаты $\gamma := \frac{c_p}{c_v} = \frac{5}{3} \quad \frac{5}{3} = 1.667$

$$c_p - c_v = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad c_p - c_v = 1 R_m$$

Изобарная теплоемкость двухатомных газов

$$c_p := \frac{7}{2} R_m = 29.1 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

Изохорная теплоемкость двухатомных газов

$$c_v := \frac{5}{2} R_m = 20.79 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

Показатель адиабаты $\gamma := \frac{c_p}{c_v} = \frac{7}{5} \quad \frac{7}{5} = 1.4$

$$c_p - c_v = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad c_p - c_v = 1 R_m$$

Рис. 8. Параметры идеального газа

Но, вернемся к нашему бестопочному паровозу.

Сейчас все увлечены водородной энергетикой, в частности *водородовозами* – транспортными средствами, работающими на водороде²⁵ и имеющие в выхлопе только воду и ни грамма углекислого газа, окислов серы и прочего вредоносного для нашей атмосферы. 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!

²⁵ 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 на керосине может при аварии сжечь себя и своих пассажиров. Самолет же на водороде может прихватить при этом весь аэропорт! Да, отапливать дом сжиженным газом намного удобнее, чем дровами или углем, но намного опаснее.

Но и производители водорода нередко выбрасывает в атмосферу черти что! Радиоактивные отходы, например, если водород производить на АЭС вместе с электричеством. А такие планы имеются.

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.

Дивертисмент 1. Ещё немного о надувательстве в термодинамике

На рисунке 9 слева показан логотип родного для авторов Института тепловой и атомной энергетики (ИТАЭ) МЭИ: T, s диаграмма паротурбинного цикла на перегретом паре (тепловая энергетика), вокруг которой вращаются электроны (атомная энергетика). Эта диаграмма, как и диаграмма на рис. 1, оказалась несколько «надутой». Ненадутая, почти правильная диаграмма показана справа на рис. 9. Дело в том, что повышение температуры воды в питательном насосе, составляет 1-2 кельвина, а не сотню кельвинов, как отображено на левой диаграмме. Её «надувают» для того, чтобы показать левый вертикальный участок идеальной работы питательного насоса. Затем идет участок нагрева воды до кипения в экономайзере (кривая прижимается к кривой воды на линии насыщения – синяя кривая на рис. 1, 2, 4 и 5), далее идет верхний горизонтальный участок (вода превращается в пар), а потом кривая взмывает вверх (перегрев водяного пара). Правый вертикальный участок диаграммы отображает идеальное расширение пара в турбине. Замыкает цикл нижняя горизонтальная прямая – процесс конденсации пара в конденсаторе турбины.

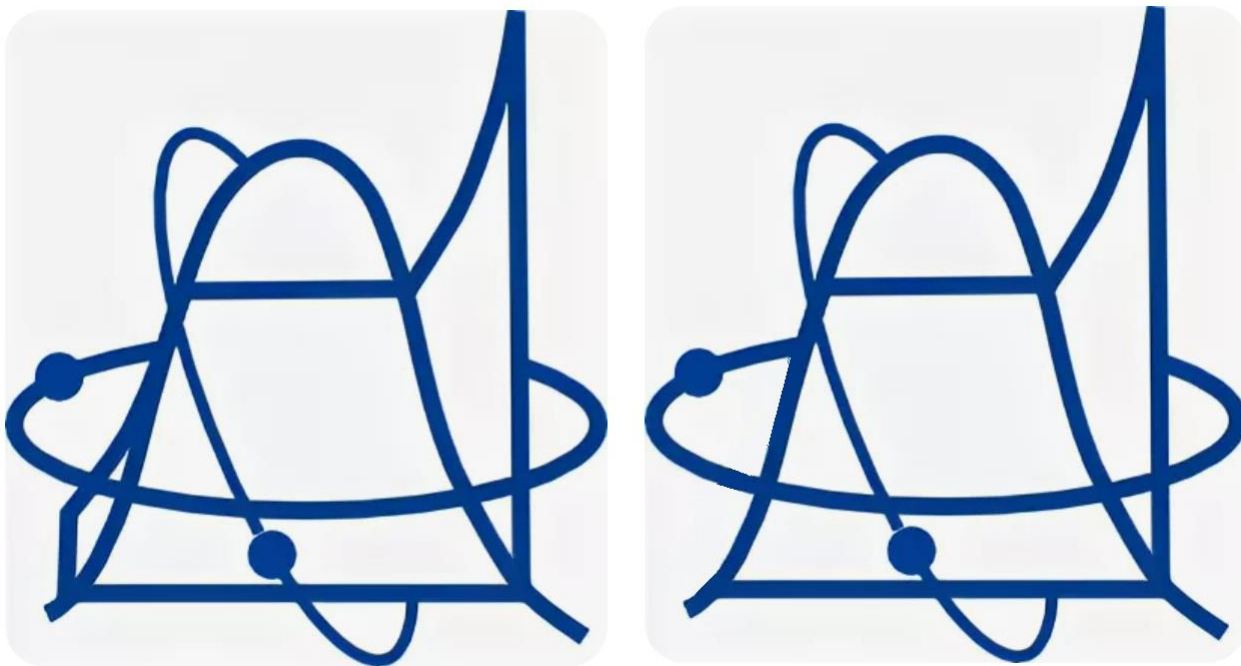


Рис. 9 Логотип института тепловой и атомной энергетики МЭИ

На рисунке 10 показана реальная, а не стилизованная диаграмма паротурбинного цикла на перегретом паре, но для разнообразия не T , s -, а T , h -диаграмма. На ней участок работы питательного насоса увеличен и помещен внутри основной диаграммы. При этом возникает иллюзия, что вода в питательном насосе становится двухфазной. Но это не так. Понять такую особенность помогут трехмерные диаграммы, одна из которых показана на рис. 11 (см. также рис. 1.9 в главе 1 с такими пересекающимися линиями).

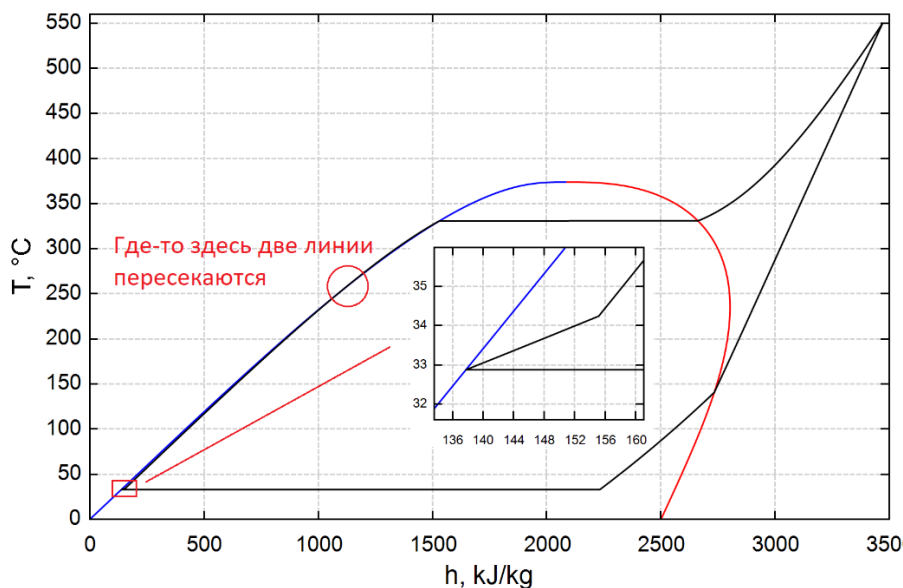


Рис. 10 T, h диаграмма паротурбинного цикла на перегретом паре

На авторском сайте <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Rankine.xmcd>

посетителю предоставляется возможность строить такие трехмерные диаграммы, изменяя параметры цикла Ренкина и наименование осей.

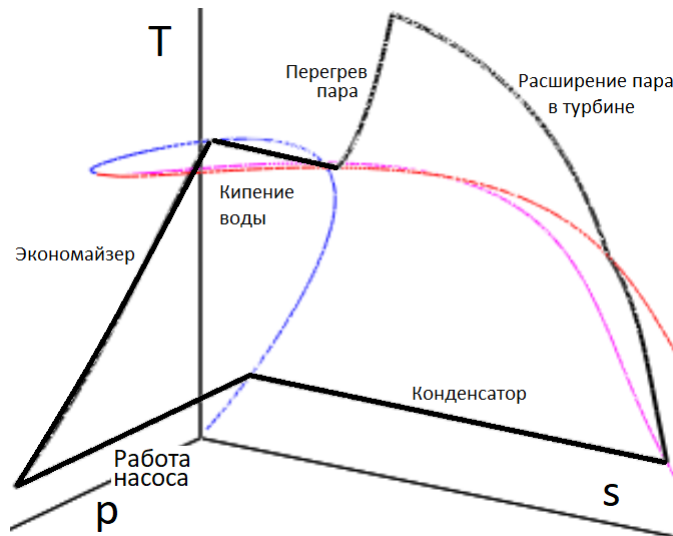


Рис. 11 T, s, p диаграмма паротурбинного цикла на перегретом паре

То, что является почти точкой на рис. П8, на самом деле является кривой работы насоса.

Рисунок 11, кстати, вскрыл еще одну недоработку диаграммы-логотипа, показанного на рис. 9: вертикальная прямая, отмечающая расширения пара в турбине, должна пересекать линию насыщенного водяного пара. Это отмечено на рис. 11 – черная кривая пересекает красную кривую и упирается в линию постоянной сухости пара (розовая кривая). А этого нет на рис. 9 – кривая расширения пара в турбине упирается в линию насыщенного водяного пара.

Дивертисмент 2. Реальная и цифровая паровая машина

На одной из своих лекций по инженерным расчётам, посвящённой работе паровой машины и её анимации, второй автор этой книги показал студентам реальную паровую машину (рис. 12) с топкой на твердом топливе ("сухой спирт" – уротропин, спрессованный с небольшим количеством парафина). И только после этого дал описание прикидочного расчета на компьютере КПД такого теплового двигателя (рис. 13). В аудитории все это – и видео, и

расчёт показывалось на большом экране. Большим экраном в аудитории сейчас никого не удивишь (см. конец главы 3 с описанием телевизоров в аудитории), а вот паровая машина на лекции – это редкость.

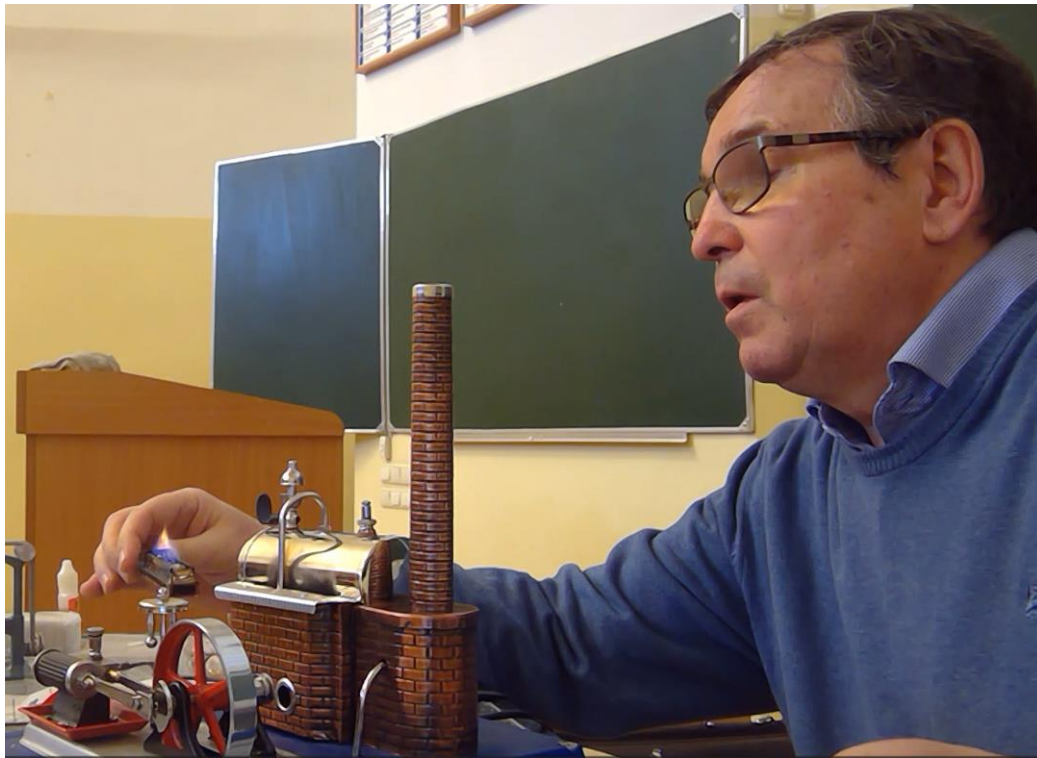


Рис. 12 Кадр записи лекции с демонстрацией паровой машины

Данное видео с комментариями лектора можно скачать с сайта книги <http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TT-SMath>.

В расчёте на рис. 13 по двум давлениям – одна атмосфера физическая и 12 килограмм силы на квадратный сантиметр определяются две температуры – нижняя (100 градусов Цельсия) и верхняя (187 градусов Цельсия). Эти два значения были вставлены в знаменитую формулу для расчета термического КПД цикла Карно – единица минус отношение температуры холодильника²⁶ (нижняя изотерма) к температуре к температуре нагревателя (верхняя изотерма). Ответ оказался не так уж плох – почти 37 процента. Но запрос в интернете дал другой ответ – у паровоза КПД находится на уровне 5-12%. Поэтому расчет был повторен, но уже с использованием функций пакета WaterSteamPro. Получен

²⁶ Вот такая температура холодильника: 100 градусов Цельсия.

Глава 1

правдоподобный ответ – 15 с половиной процента. Если же перейти к реальному процессу расширения влажного пара в цилиндре паровой машины паровоза (см. рис. 9.23 и 9.24 в главе 9), то КПД снизится до ожидаемых 5-12%.

$$\begin{aligned} p_{atm} &:= 1 \text{ atm} & p &:= 12 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} & T_{\text{воды}} &:= 20 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{Исходные данные} \\ T_{atm} &:= \text{wspTSP}(p_{atm}) = 100 \text{ }^{\circ}\text{C} & T &:= \text{wspTSP}(p) = 187.1 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{Две температуры цикла Карно} \\ \eta_t &:= 1 - \frac{T_{\text{воды}}}{T} = 36.3 \% & \text{КПД цикла Карно} \end{aligned}$$

1. Вода в баке паровоза

$$T_1 := T_{\text{воды}} \quad s_1 := \text{wspSPT}(p_{atm}, T_1) = 0.2965 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad h_1 := \text{wspHPT}(p_{atm}, T_1) = 84.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

2. У воды подняли давление

$$s_2 := s_1 \quad p_2 := p \quad h_2 := \text{wspHPS}(p_2, s_2) = 85.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad T_2 := \text{wspTPH}(p_2, h_2) = 20.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3. Воду нагрели до кипения

$$T_3 := T \quad s_3 := \text{wspSSWT}(T_3) = 2.208 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad h_3 := \text{wspHSWT}(T_3) = 794.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4. Воду превратили в пар

$$T_4 := T \quad p_4 := p \quad s_4 := \text{wspSSST}(T_4) = 6.529 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad h_4 := \text{wspHSST}(T_4) = 2783 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

5. Пар толкает поршень паровой машины

$$s_5 := s_4 \quad p_5 := p_{atm} \quad h_5 := \text{wspHPS}(p_5, s_5) = 2367 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad x_5 := \text{wspXPH}(p_5, h_5) = 86.34 \%$$

Считаем КПД паровоза

$$\begin{aligned} q_1 &:= h_4 - h_1 = 2699 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} & l_{\text{пм}} &:= h_4 - h_5 = 415.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} & l_{\text{н}} &:= h_2 - h_1 = 1.077 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \eta_t &:= \frac{l_{\text{пм}} - l_{\text{н}}}{q_1} = 15.36 \% \end{aligned}$$

Рис. 13 Вычислительная оценка КПД паровоза

Дивертисмент 3. Опыты с запаянной ампулой

Ранее мы упомянули о лабораторной работе (см. сноску 16) с запаянной стеклянной ампулой (капсулой), частично заполненной водой, которую нагревали в печи, наблюдая при этом за уровнем воды в ней.

А давайте рассчитаем, как будет меняться уровень воды в таком... бестопочном паровозе – см. рис. 14-16.

На рисунке 14 показано, как из решения уравнения "масса воды и пара в ампуле m равна сумме массы воды m_W и массы пара m_S " получается итоговая формула с дробью, по которой рассчитывается объём сухого насыщенного пара в зависимости от объёма ампулы V , плотности воды на линии насыщения d_W , степени сухости пара x и плотности насыщенного водяного пара d_S . Для решения уравнения, занесённого в переменную f , используется функция `solve` из программы Maple, подгруженной к SMATH в качестве приложения (плагина). Уравнение, конечно, можно решить и вручную, но почему же не воспользоваться компьютером! Чем более, что при ручных манипуляциях (раскрытие скобок, перенос фрагментов уравнения из одной части в другую и др.) возможны ошибки. Из-за этого – из-за решения даже простейших задач на компьютере мы отучаемся делать расчёты в уме и на бумаге, что не очень хорошо. Компромисс – решить задачу в уме²⁷, а потом проверить решение на компьютере.

$$x = \frac{m_S}{m} \quad m = \frac{m_S}{x} \quad m = \frac{V_S \cdot d_S}{x}$$

$$m = m_S + m_W \quad m = V_S \cdot d_S + (V - V_S) \cdot d_W$$

$$f := \frac{V_S \cdot d_S}{x} = V_S \cdot d_S + (V - V_S) \cdot d_W$$

$$\text{maple} \left(\text{solve} \left(f, V_S \right) \right) = \frac{V \cdot d_W \cdot x}{d_S \cdot (1 - x) + d_W \cdot x}$$

²⁷ Врачи рекомендуют пожилым людям так тренировать свою память: набирать номер телефона по памяти, затем сверять его в базе данных и только потом соединяться с абонентом.

Сделано допущение, что в ампуле мы имеем двухфазную среду (область 4 – см. главу 1), где давление и температура взаимосвязанные параметры.

На рисунке 15 показано, как создается функция пользователя с именем V_W и двумя аргументами T (температура) и d (интегральная плотность воды и водяного пара).

Правильнее нужно сказать так: у функции V_W есть аргумент T (температура) и параметр d . Аргумент мы будем менять в диапазоне значений от 20°C до 250°C с шагом в один градус Цельсия (в один кельвин), задавая разные дискретные значения параметра d .

$$V_W (T , d) := \left| \begin{array}{l} V := 20 \text{ mL} \\ d_S := \text{wspDSST} (T) \\ d_W := \text{wspDSWT} (T) \\ x := \text{wspXSTD} (T , d) \\ V_S := \frac{V \cdot d_W \cdot x}{d_S \cdot (1 - x) + d_W \cdot x} \\ V_W := V - V_S \end{array} \right.$$

$$T := [20 \text{ } ^\circ\text{C}, 21 \text{ } ^\circ\text{C} \dots 250 \text{ } ^\circ\text{C}]$$

Рис. 15 Создание функции пользователя для расчета водяного пара в ампуле

Казалось бы, что если в ампулу или в котел бестопочного паровоза залить воды, а затем все это изохорно нагревать, то уровень воды (объем воды) должен падать (уменьшаться) за счет перехода жидкой фазы в газообразную. Но это не так, вернее, не совсем так. Из графиков рисунка 16 видно, что объем воды увеличивается (левый график – тела и жидкости при нагревании расширяются), а затем может падать (правый график – жидкости при нагревании испаряются). Суммирование этих процессов (расширение и испарение) и дает горбатую кривую, показанную справа на рис. 16, и это зависит от параметра d – от начальной

плотности воды и водяного пара в состоянии насыщения²⁸. На рисунке 16 заданная плотность была равной 400 и 70 килограмм на метр кубический.

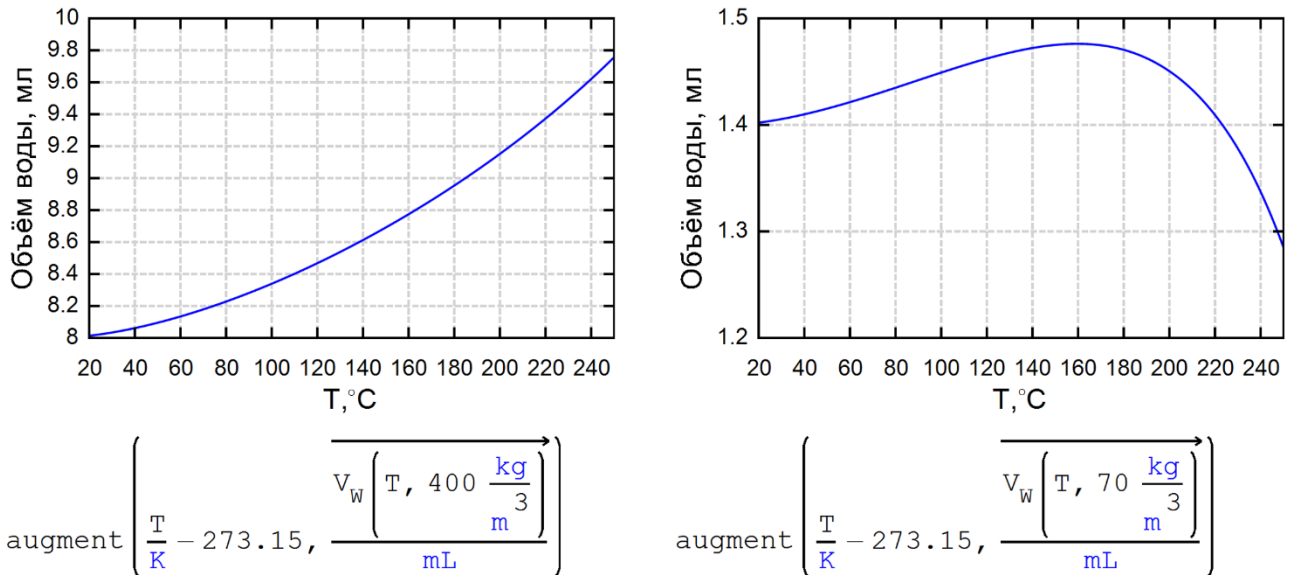


Рис. 16 Графики изменения объёма воды в ампуле

Задание читателям

1. Постройте диаграммы, показанные на рис. 4 и 5 в других координатах: энтальпия, энтропия, показатель адиабаты, сжимаемость и проч.
2. Создайте расчёт идеального паротурбинного цикла на перегретом водяном паре такой, чтобы процесс расширения пара в турбине заканчивался на линии насыщения так, как это показано на рис. 9. Постройте реальную такую необычную диаграмму.
3. Создайте анимацию движения поршня паровой машины, показанной на рис. 12, дополнив ее движущейся точкой на диаграмме. Ось абсцисс такой диаграммы может фиксировать положение поршня. Такая диаграмма называется индикаторной диаграммой.
4. Создайте в среде SMath диаграммы работы паровой машины по расчету, показанному на рис. 1
5. Постройте поверхность, отображающую функцию V_W с аргументами T и d .

²⁸ Здесь можно было написать "от начальной влажности пара", но влажный пар – это то, что выходит из носика чайника при его кипении: некий туман, состоящий из пара на линии насыщения с каплями влаги (гетерогенная система). Но у нас в и в ампуле, и в котле бестопочного паровоза имеются две гетерогенные системы – вода на линии насыщения на дне и насыщенный водяной пар над водой. Кстати, если посмотреть вблизи на носик кипящего чайника, то можно заметить, что сначала выходит прозрачный пар, который затем мутнеет – превращается во влажный пар, вернее, в смесь влажного пара с воздухом, который охлаждает пар. При этом пар проходит нестабильную стадию переохлаждения – см. рис. 1.12. в главе один.

Литература и ссылки:

1. Очков В.Ф., Орлов К.А. Когда $p \propto v = T$ // Законодательная и прикладная метрология. № 2. 2022. С. 38-44 (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf>)
2. <https://yandex.ru/video/preview/1403178835808877912>
3. https://vk.com/wall357070788_6186?ysclid=lx44i7e6fo763141952
4. Очков В.Ф. SMath и CoolProp: Теплофизические свойства жидкостей и газов – доверяй, но проверяй // Энергия: экономика, техника, экология, №7, 2023 (<http://www.twi.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-7-2023-CoolProp-WSP.pdf>)
5. 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://twi.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html>)
6. Очков В.Ф. Физика и метафизика магнитной обработки воды // Энергия: экономика, техника, экология. № 1, 2022, С. 36-43 (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/Energia-MO-1-2021.pdf>).
7. Очков В.Ф., Очкова Н. А. Лев Толстой и математика /– Москва: МПГУ, 2023 (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/Tolstoy-Math-3.pdf>)
8. https://ru.wikipedia.org/wiki/Пневматическая_железная_дорога
9. Установки для трансформации тепла и охлаждения: расчеты на SMath : учебное пособие для вузов / Н. Л. Бударин, А. В. Мартынов, В. Ф. Очков [и др.]. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. (<https://e.lanbook.com/book/414824>)