

УДК 621.1.36.7(035.5)

Справочная информация

Парогазовые циклы: три аспекта компьютерных расчетов

Очков В.Ф.^{1,2}, Орлов К.А.^{1,2}, Кузнецов В.Н.¹, Знаменский В.Е.¹, Аунг Ту Ра Тун¹

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»¹

Объединенный институт высоких температур РАН²

e-mail: ochkov@twi.mpei.ac.ru

В статье рассмотрены три аспекта ведения расчетов бинарных циклов в современных программных средах с открытым, интерактивным, сетевым форматом. Рассматривается подключение к расчетам общедоступных баз данных по теплофизическим свойствам рабочих тел, работа с физическими величинами, а не только с единицами их измерения и оперирование живыми диаграммами бинарных термодинамических циклов: одно и двух-контурных. Рассмотрены такие способы подключения к расчетам баз данных по свойствам веществ: ссылки на облачные файлы, подключение баз данных через механизм DLL (Dynamic Link Library) и полное интегрирование баз данных в расчетные программы. Обсуждается технология масштабирования и сдвига плоских и объемных диаграмм бинарных циклов для количественного, а не только качественного графического отображения термодинамических и теплообменных параметров энергоустановок.

Ключевые слова: бинарный цикл, теплофизические свойства веществ, рабочих тел и теплоносителей, теплотехнические расчеты, Mathcad, Maple, физические величины, диаграммы бинарных циклов.

¹111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 14. НИУ «МЭИ».

²125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2. ОИВТ РАН

В настоящее время инженерные и научно-технические расчеты проводятся сугубо на компьютерах. Это касается и теплотехнических расчетов, связанных с

парогазовыми установками (ПГУ), которые в настоящее время активно внедряются в российской и мировой энергетике [1-4].

За рубежом созданы коммерческие закрытые компьютерные программы для таких задач, в частности, для расчетов термодинамических циклов (например, программы Thermoflow, Gate Cycle, Boiler Designer, KPRO, OMEGA, UNITED CYCLE и др.). Эти программы работают по принципу «черного ящика», куда кладут массивы исходных данных, «закрывают крышку ящика» (нажимают кнопку «Рассчитать»), «открывают крышку ящика и вынимают из него» ответ – параметры проектируемого теплотехнического оборудования. Но всегда хочется иметь хотя бы общее представление о том, что происходит внутри этого «черного ящика», знать, правильно ли ведутся расчеты, видеть промежуточные результаты и все формулы, по которым они проводятся. Приоткрывать крышку «ящика» полезно и в образовательных целях – для изучения математических моделей, заложенных в расчет. Это касается не только студентов вузов, но и инженерно-технических работников научных, проектных и наладочных организаций, повышающих свою квалификацию в том числе и через самообразование, а также посредством работы с открытыми программами. Еще одной актуальной побудительной причиной «вскрытия» таких «черных ящиков» стали участвовавшие случаи некорректного применения таких программ к конкретным теплотехническим задачам. Это объясняется отсутствием открытых данных о границах применимости использованных в программах численных математических методов и связанными с такой некорректностью неустраняемыми ошибками.

Необходимо также иметь в виду, что всякого рода мощные средства для теплотехнических расчетов типа упомянутых выше программ очень часто нельзя использовать для решения нестандартной, но актуальной и оперативной задачи, которую мы можем в принципе решить и «ручкой на бумаге», но для ускорения расчетов и исключения ошибок в них проводим на компьютере. Иногда, например, необходимо просчитать некую «сумасшедшую» теплотехническую идею¹, но готовые программы не позволяют этого делать, либо делают это некорректно. Кроме того, нужно помнить, что «программы-монстры» стоят больших денег, которых не хватает во многих небольших инженерных бюро, надежно защищены от копирования,

¹ Идею, например, цикла с тремя рабочими телами: водой/водяным паром, газом и неким хладагентом, который работает в тепловом насосе, переводящим избыток электроэнергии в тепло и исключающим из работы пиковые водогрейные котлы.

требуют сложного и дорогостоящего сервисного обслуживания посторонними специалистами и что на их изучение требуется много времени и сил, которых тоже не хватает. Нужно также иметь в виду, что над такими импортными программами висит «дамоклов меч» западных санкций: эти программы не могут работать без постоянной сервисной поддержки, которая может в любой момент прекратиться по политическим мотивам. Все это заставляет в целях импортозамещения активизировать работу по созданию подобных отечественных расчетных средств.

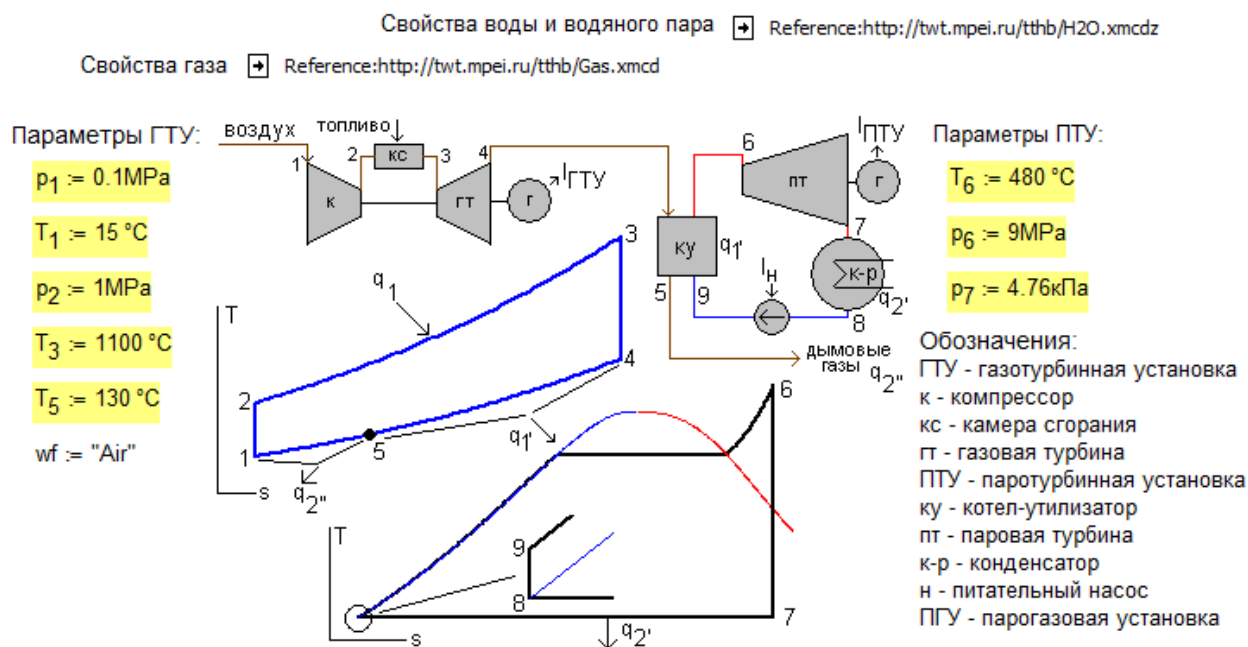
С другой стороны, для тех же компьютеров созданы универсальные, недорогие (а в ряде случаев даже бесплатные) и простые в освоении программы для инженерных и научно-технических расчетов: Excel, Mathcad, MATLAB, Maple, Mathematica, SMath и другие, которые вряд ли могут попасть под режим санкций вследствие их широкого распространения и независимости от сервисного обслуживания. Триаде «универсальность–дешевизна–доступность» лучше всего отвечают пакеты Mathcad и Maple. Maple – это в первую очередь пакет аналитических преобразований, символьной математики, а Mathcad – численных выкладок. При анализе и расчете термодинамических циклов используются оба этих инструмента в отдельности или в сочетании, как это будет показано ниже. У пользователей пакетов Mathcad и Maple также есть дополнительная возможность публикации расчетов для их использования через Интернет без установки на компьютере самих пакетов. Это реализуется технологиями Mathcad Calculation Server (см. конец статьи), PTC Mathcad Gateway и MapleNet. Пакет Excel – это бухгалтерские электронные таблицы, в которых, конечно, можно вести довольно сложные научно-технические расчеты, но в этих расчетах через некоторое время может запутаться даже сам автор, не говоря уже о тех, кто захочет эти расчеты изучить, дополнить, расширить. Тем не менее, если у вас есть готовый отлаженный расчет, сделанный в среде Excel, то его несложно вставить в Mathcad-документ с обменом данными между этими двумя популярными у инженеров расчетными средами. Если же говорить о пакете MATLAB, то это скорее язык программирования, чем математический пакет – язык программирования технических расчетов, как его позиционируют сами разработчики. Дополнительное преимущество пакета Mathcad состоит еще и в том, что есть его отечественный клон – пакет SMath, на который в случае чего можно заменить сам пакет Mathcad.

Первый аспект компьютерных теплотехнических расчетов состоит в следующем.

Успех применения компьютеров для решения теплотехнических задач существенно зависит от того, как и какие модули по теплофизическим свойствам рабочих тел, теплоносителей и конструкционных материалов используются в расчетных программах.

Реализованы три основных метода интеграции в расчетные программы баз данных по теплофизическим свойствам веществ.

Во-первых, пользователи пакета Mathcad 15 через команду Вставить/Ссылка могут делать Интернет-ссылки (Reference) на общедоступные сетевые Mathcad-документы, хранящие функции по свойствам рабочих тел и теплоносителей энергетики. Эта авторская интернет-технология уже довольно хорошо описана в литературе и отображена на рисунке 1, взятом из [5, 6].



Удельная энтальпия водяного пара на входе в турбину: $h_6 := \text{wspHPT}(p_6, T_6) = 3336.3 \text{ кДж/кг пара}$

Удельная энтальпия воздуха на входе в компрессор: $h_1 := \text{wspgHGST}(wf, T_1) = 288.56 \text{ кДж/кг газа}$

Рис 1. Ссылки на облачную базу данных по свойствам веществ

Для расчета простейшего ПГУ в среде Mathcad 15 (см. его начало на рис. 1) были сделаны ссылки на облачные файлы с именами H₂O и Gas и с расширением xmcd (на Mathcad-документы), хранящиеся в Интернете по адресу <http://twt.mpei.ru/tthb>². После таких ссылок в рабочем документе становятся

² Этот адрес запомнить несложно: twt – аббревиатура кафедры Технологии воды и топлива (ныне она входит в состав кафедры Теоретических основ теплотехники), НИУ «МЭИ» (mpei), который расположен в России (ru). Аббревиатура tthb – это папка электронной версии справочника (handbook – hb) по теплотехнике и теплоэнергетике (tt).

доступными (видимыми, как говорят программисты) порядка 50 функций по теплофизическим свойствам двух рабочих тел: воды/водяного пара (H_2O) и газов (Gas), в частности воздуха, некоторые из которых будут использованы в расчете, показанном на рис. 1. Весь расчет хранится в Интернете по адресу <http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/PGU.xmcdz>. Его можно открыть в среде Mathcad 15. На рисунке 1 для компактности представлен расчет простейшей ПГУ. На авторском сайте <http://tw.t.mpei.ac.ru/ТТНВ/tdc.html> читатель найдет открытые интерактивные сетевые расчеты более сложных циклов ПГУ, а именно:

- ПГУ с приводом компрессора от паровой турбины.
- ПГУ с многоступенчатым сжатием воздуха, многоступенчатым подводом тепла и одноконтурным котлом-утилизатором.
- ПГУ с высоконапорным парогенератором.
- ПГУ с двухконтурным котлом-утилизатором и применением двухступенчатого нагрева питательной воды в экономайзере.
- ПГУ с полузависимой схемой (с вытеснением регенерации).
- ПГУ с многоступенчатым сжатием воздуха, многоступенчатым подводом тепла и двухконтурным котлом-утилизатором.
- ПГУ с трехконтурным котлом-утилизатором.
- Утилизационная ПГУ.
- ПГУ с параллельной схемой.
- ПГУ, использующей ГТУ ГТЭ-110 ОАО "Сатурн".
- Расчет тепловой схемы одноконтурной ПГУ, выполненной по схеме дубли-блока.
- Сбросная и утилизационная ПГУ.
- Трехконтурная ПГУ с промежуточным перегревом пара и др.

Второй способ работы с базами данных по свойствам веществ состоит в следующем.

Функции, хранящиеся в облачных Mathcad-файлах $H_2O.xmcd$ и $Gas.xmcd$, составляют малую часть авторского сертифицированного Госстандартом России пакета WaterSteamPro, который можно скачать с сайта www.wsp.ru и установить на своем компьютере для использования во всех популярных отечественных и импортных расчетных средах – в электронных таблицах Excel, в языках программирования, в математических пакетах, из которых, как уже отмечено, особо

выделяются пакеты Mathcad и Maple в том числе и тем, что в их средах можно работать с единицами измерения физических величин, что очень облегчает и ускоряет расчеты, исключает многие ошибки в них.

После подключения через механизм DLL к расчетным программам пакета WaterSteamPro функции по теплофизическим свойствам воды, водяного пара и газов и в среде Mathcad 15 и Mathcad Prime работают с базовыми единицами СИ (кельвины, паскалы, джоули) без контроля размерностей. Пакет Mathcad Prime в функциях с префиксом `wsp` принимает и размерные аргументы. Пакет же Mathcad 15 при размерных аргументах выдает сообщение об ошибках. Но на базе безразмерных встроенных функций пакета WaterSteamPro в среде Mathcad переопределением можно создать размерные функции, что, повторяем, делает расчеты более комфортными и надежными. В среде Mathcad 15 это делается ссылкой на системный файл `watersteampro.xmcd`, который осуществляет переопределение функции и который поставляется вместе с пакетом. Но можно такое переопределение сделать не для всех, а только для отдельных функций, нужных в конкретном расчете [6]. Это облегчает и ускоряет расчеты.

Мы описали два авторских подхода к использованию функций по свойствам рабочих тел и теплоносителей в компьютерных теплотехнических расчетах:

- ссылка на облачные функции (см. рис. 1), которая пока возможна только в среде Mathcad 15; такие ссылки допустимы не только для файлов по воде/водяному пару и газу (см. рис. 1), но и на файлы по другим теплоносителям и рабочим телам – для хладагентов R22, R407c, Тoluол, R410a, R290, R134a, CO₂, NH₃, этанол и др. Найти адреса этих облачных файлов можно на авторских сайтах <http://twf.mpei.ru/rbtpp> и www.trie.ru, где через окно поиска ищется нужная информация по конкретному веществу или теплофизическому свойству.
- скачивание и подключение к расчетам специальных пакетов – пакета WaterSteamPro, например; эта возможность реализована для всех популярных расчетных оболочек, отмеченных выше.

Но есть еще и третий путь, по которому пошла фирма Maplesoft (www.maplesoft.com) – разработчик второй по популярности после Mathcad математической программы – программы Maple. В последнюю версию этой программы – в Maple 2016 встроен пакет CoolProp (см. www.coolprop.org), что позволяет непосредственно работать с функциями по теплофизическим свойствам многих рабочих тел, теплоносителей и хладагентов.

В начале 2016 г. фирма Maplesoft предложила авторам данной статьи протестировать новый Maple с удобным для инженеров-теплоэнергетиков средствами и продублировать некоторые Mathcad-примеры из книги [7] в среде Maple. Результаты тестирования – готовые решения задач термодинамики помещены на сайте Maple Application Center: <http://www.maplesoft.com/applications/Category.aspx?cid=2886>.

Для работы с базами данных в среде Maple 2016 необходимо и достаточно подключить их командой `with(ThermophysicalData)`, а затем формировать необходимые для расчетов пользовательские функции через встроенную функцию `Property` (Свойство). Так, например, если в расчете необходима функция, возвращающая удельную энтропию воды/водяного пара в зависимости от плотности и температуры, то достаточно выполнить следующую команду:

$$\text{wspPDT} := (D, T) \rightarrow \text{Property}(\text{entropy}, \text{H}_2\text{O}, \text{density} = D, \text{temperature} = T)$$

Этой командой будет сгенерирована пользовательская функция с именем `wspSDT`, имя и структура которой отвечает общепринятому пользователям пакета `WaterSteamPro` стандарту: префикс `wsp`, далее начальная буква названия или символ рассчитываемого параметра (`S` – удельная энтропия), далее начальные буквы названий или символы исходных параметров: `D` – плотность и `T` – температура. Если в вышеприведенной встроенной функции `Property` заменить аргумент `H2O`, на `Air`, то будет рассчитано термодинамическое свойство воздуха, соответственно.

Вторым аспектом компьютерных вычислений бинарных циклов является работа не просто с единицами измерения, а с физическими величинами.

Пакеты Maple и Mathcad, как известно, могут оперировать не просто числами в переменных, а числами с единицами измерения длины, времени, энергии, мощности и т.д. Именно, единицами измерения, а не самими физическими величинами. При этом в пакет Mathcad, особенно в его последней версии – в пакет Mathcad Prime этот инструментариий внедрен намного глубже, чем в «старый» Mathcad или пакет Maple, где, например, нельзя проводить оптимизацию с размерными величинами, строить по ним графики и т.д. Но и пакет Mathcad не всегда способен правильно решать размерные задачи встроенными средствами. Тут приходится прибегать к пользовательским инструментам, позволяющим вводить в расчет разные физические величины с одинаковыми единицами измерения. Поясним это на примере расчета нашего цикла ПГУ (рис. 1). На рисунке 2 показан его заключительный фрагмент – итоговый расчет по формуле термического КПД. При первой попытке расчета произошла ошибка, т.к. в формуле складываются физические величины с одинаковыми единицами измерения (кДж/кг), но разные по своей сути (удельная

энтальпия первого рабочего тела и удельная энтальпия второго рабочего тела). Без дополнительного пользовательского механизма учета физических величин была бы большая вероятность, что ошибка осталась бы в расчете.

$$\text{кДж/кг газа} := 1000 \frac{\text{J}}{\text{cd}} \quad \text{кДж/(кг газа} \cdot \text{K)} := 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg cd}} \quad \text{кг газа} := \text{cd}$$

Термический КПД бинарного утилизационного цикла: $\eta_{\text{ПГУ}} := \frac{I_{\text{ГТУ}} + I_{\text{ПТУ}}}{q_1} = \blacksquare \%$

Разные физические величины

Термический КПД бинарного утилизационного цикла: $\eta_{\text{ПГУ}} := \frac{m \cdot I_{\text{ГТУ}} + I_{\text{ПТУ}}}{q_1} = 63.05 \%$

где $m = 8.265 \frac{\text{кг газа}}{\text{кг пара}}$ (отношение расхода газа к расходу воды и водяного пара),

$I_{\text{ГТУ}} = 423.913 \text{ кДж/кг газа}$ (удельная работа газотурбинного цикла),

$m \cdot I_{\text{ГТУ}} = 3503.62 \text{ кДж/кг воды}$ (удельная работа газотурбинного цикла на кг воды и водяного пара),

$I_{\text{ПТУ}} = 1322.94 \text{ кДж/кг воды}$ (удельная работа паротурбинного цикла),

$m \cdot I_{\text{ГТУ}} + I_{\text{ПТУ}} = 4826.55 \text{ кДж/кг воды}$ (удельная работа бинарного утилизационного цикла) и

$q_1 = 7655.13 \text{ кДж/кг воды}$ (удельная теплота, подведенная к ПГУ).

Рис. 2. Завершение расчета цикла ПГУ

Ремарка. При выводе составной единицы измерения удельной энтальпии в среде Maple к этой физической величине прибавляется упрощенное³ выражение (составная единица измерения) m^2/s^2 , которую пользователь должен заметить на более привычные кДж/кг. А на какой именно килограмм?

В бинарном цикле, показанном на рис. 1, циркулируют два “килограмма” – “килограммы” газа (воздуха – первое рабочее тело) и “килограммы” воды/водяного пара (второе рабочее тело). Их соотношение хранится в переменной m , которая традиционно считается безразмерной. Но расход газа и расход воды/водяного пара в термодинамическом цикле – это, повторяем, *разные* физические величины, имеющие *одинаковые* единицы измерения. Этот нюанс учтен в наших расчетах бинарного цикла вводом не разных физических величин, а разных единиц их измерения – см. рис. 2, где под килограммы первого рабочего тела (газа) зарезервирована единица измерения, не используемая в данном расчете – кандела (cd). Это позволяет избежать ошибок в расчете, когда складывается, например, удельная работа газовой турбины с удельной работой

³ Такие упрощения, искажающие физический смысл величин, кстати, делает и человек, приписывающий, например, теплопроводности единицу $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ вместо более правильной $\text{W} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, учитывающей физическую суть закона Фурье, где фигурируют и длина (m) и площадь (m^2), а не только длина.

паровой турбины без учета величины m , которая в данном случае будет уже размерной с единицей кг газа/кг пара. Пример расчета, приведенный на рис. 2, очень простой, где ошибку несложно заметить и исправить. Но при расчетах двух и трехконтурных ПГУ, где балансные формулы намного сложнее, вероятность появления такого рода ошибок довольно велика. Избежать их позволяет вышеописанный прием назначения термодинамическим величинам с одинаковыми единицами измерения статуса разных физических величин и отказа считать отношения расходов рабочих тел безразмерными величинами.

Тут следует отметить, что большинство компьютерных программ расчета теплотехнических установок, упомянутых выше, не работают ни с физическими величинами, ни с единицами их измерения. Но в настоящее время это становится неприемлемым, не только из-за возможных ошибок в расчетах, но и по причине возросших требований по документированию расчетов, которые, в частности, требуют, чтобы после каждой использованной формулы были расписаны не только переменные с их текущими числовыми значениями, но и сочетания переменных (отдельные части формул), раскрывающие ее физическую суть. Это отмечено на рис. 2, где после формулы подсчета значения термического КПД цикла ПГУ дана роспись отдельных физических величин, из которой, в частности, видно, что вклад газовой турбины в производство электроэнергии в ПГУ намного больше вклада паровой турбины.

Третий аспект компьютерных расчетов бинарных циклов заключается в нестыковках графического отображении термодинамических циклов с двумя рабочими телами на различных диаграммах, которыми часто иллюстрируют циклы. А такая иллюстрация важна не только для образования и самообразования, но и для контроля корректности расчетов.

Обычно для графического отображения процессов преобразования энергии используют две диаграммы: QT -диаграмму, отражающая процесс генерации пара в котле-утилизаторе, и hs -диаграмму процесса расширения пара в турбине. При этом часто не публикуют диаграммы цикла ГТУ, что снижает наглядность процессов, происходящих в бинарных циклах, иллюстративность их взаимосвязи.

Современные математические программы позволяют такие иллюстрации делать довольно быстро и точно. Более того, в последнюю версию Maple, о которой мы уже упоминали, – в Maple 2016 вшит оператор, позволяющий строить, например, $p-v$ диаграммы холодильных установок и тепловых насосов. Но вспомогательные пользовательские действия дают возможность легко и быстро создавать и другие

диаграммы: T_s , h_s , T_h и т.д. При этом диаграммы будут «живыми»: если изменить исходные данные, то линии на диаграммах переместятся на новое место, фиксируя изменения в расчете. Этот аспект очень важен в настоящее время, т.к. сейчас в электронный вид переводятся не только учебники для студентов, но и техническая документация и разного рода производственные инструкции с иллюстрациями. Но тут возникают проблемы, связанные, в частности, с горизонтальным и вертикальным позиционированием таких графиков, а также с их масштабированием.

Что это такое?

Для теплотехнических расчетов важны не сами абсолютные значения удельной внутренней энергии, эксергии, энтальпии и энтропии рабочих тел, а только их изменения, фиксирующие направление и/или степень совершенства тех или иных теплофизических процессов, связанных с рабочими телами. По этой и другим причинам разработчики баз данных по термодинамическим свойствам веществ берут разные точки отсчета для расчета абсолютных значений каллорических свойств рабочих тел, не руководствуясь какими-то едиными стандартами. Так, для расчета значений каллорических свойств воды/водяного пара, как правило, принимают равными нулю абсолютные значения удельной внутренней энергии и энтропии жидкости в тройной точке воды, а для многих газов – точкой отсчета принимаю точку при нормальном (атмосферном) давлении с температурой 0 К.

Если энтальпия увеличивается, то к рабочему телу подводится энергия, и наоборот. Если водяной пар или газ в турбине расширяется с увеличением энтропии, то процесс считается необратимым, и т.д. По степени же увеличения значения энтропии судят о степени необратимости этого процесса, что фиксируется внутренним относительным КПД энергоустановок.

На рисунках 3–6 показаны «живые» диаграммы поведения рабочих тел в простейшей ПГУ, показанной на рис 1, где была изображена «мертвая» диаграмма. «Мертвая», повторяем, в том смысле, что изменение начальных параметров цикла никак не сказывается на ее виде. Чего не скажешь о «живой» диаграмме.

На рисунках 3 и 4 показаны две традиционные «живые» диаграммы: диаграмма цикла ПГУ на перегретом водяном паре (слева: линии с точками 6, 7, 8 и 9) и диаграмма цикла ГТУ (справа: линии с точками 1, 2, 3, 4 и 5). На свободных местах диаграмм помещено увеличение участка цикла ПГУ вблизи питательного насоса и схема одноконтурного котла-утилизатора с экономайзером, испарительной частью и пароперегревателем. У котла П-образная компоновка, что нетипично для котлов-

утилизаторов парогазовых установок. На рисунках такая схема прорисована для компактности. Читатель может мысленно перенести пароперегреватель в верхнюю часть котла, чтобы получилась некая башенная схема, принятая для ПГУ в видах уменьшения газодинамических потерь.

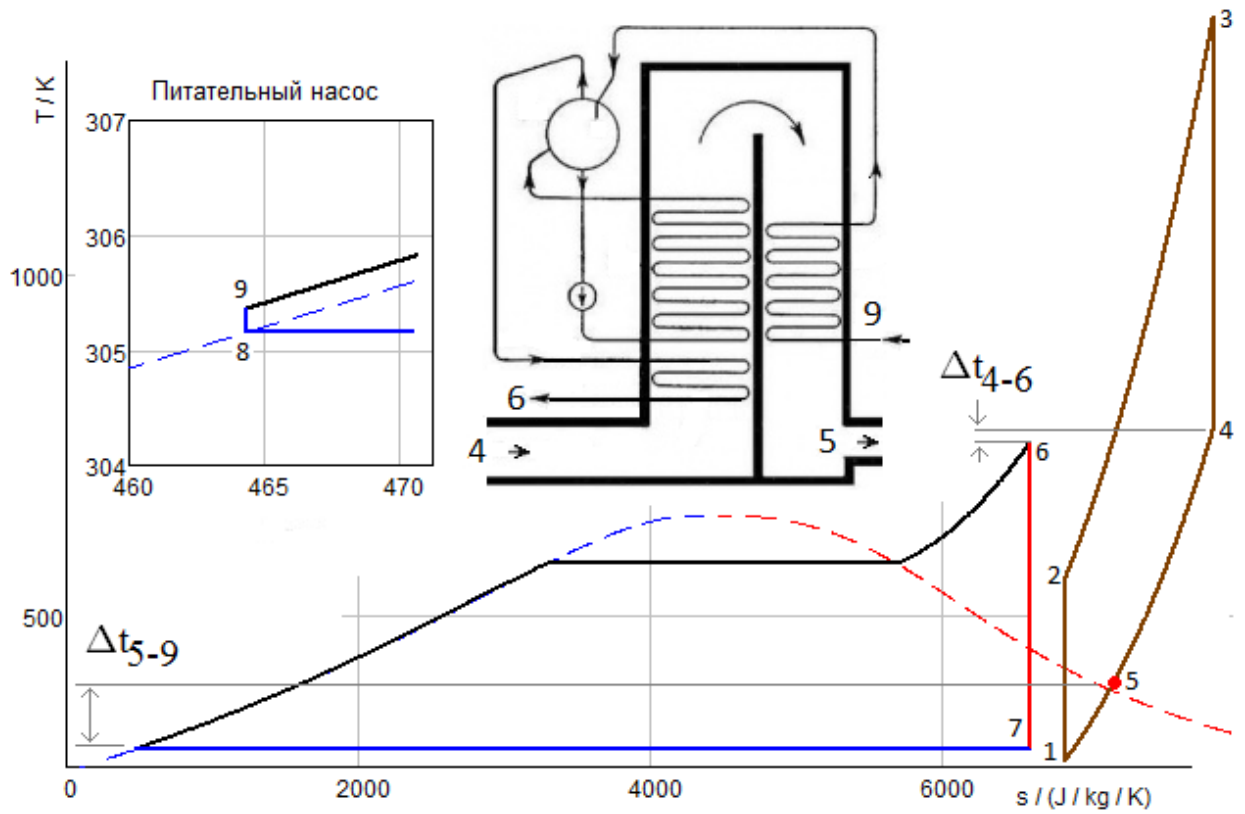


Рис. 3. Исходная Ts «живая» диаграмма бинарного цикла ПГУ

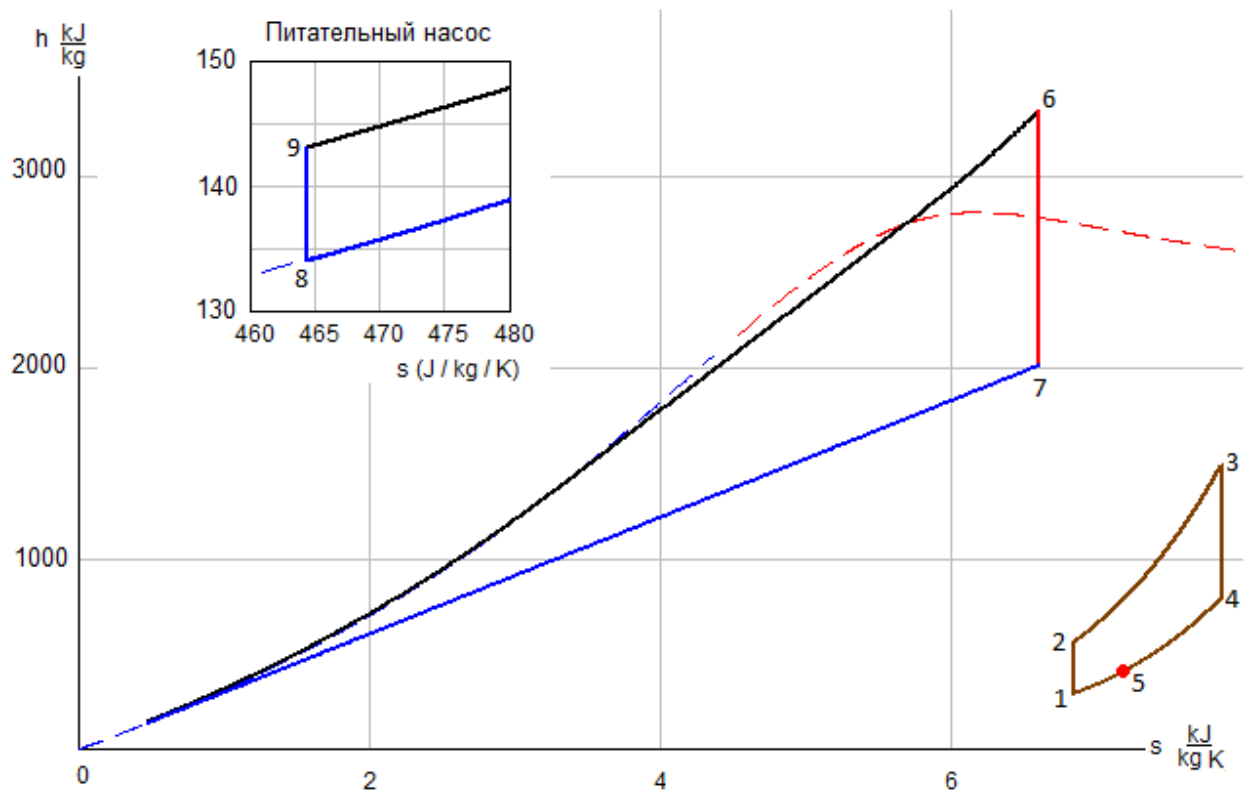


Рис. 4. Исходная h - s -диаграмма бинарного цикла ПГУ

Какую-либо полезную количественную информацию из диаграмм, показанных на рис. 3 и 4, получить довольно трудно. Более того, они дают искаженную информацию о вкладе двух рабочих тел в процесс производства электроэнергии на ПГУ: «петля» цикла ГТУ намного меньше «петли» цикла ПТУ, хотя на самом деле газовая турбина производит электроэнергии в несколько раз больше своей пароводяной напарницы – см. рис. 2, и мы это уже отметили. Из диаграммы на рис. 3 можно только проследить за температурными напорами (Δt_{5-9} и Δt_{4-6}) на краях котла-утилизатора, представляющего из себя противоточный теплообменник. Но проанализировать этот температурный напор внутри котла-утилизатора невозможно.

Другая картина наблюдается, если на диаграммах, во-первых, учесть значение параметра m (отношение расхода газа к расходу воды/водяного пара) и, во-вторых, сделать сдвиг диаграмм, нивелирующий разные базовые точки отсчета **калорических** свойств используемых двух рабочих тел бинарного цикла – см. рис. 5 и 6.

На рисунке 5 традиционная h - s диаграмма показана с увеличением на величину m масштаба цикла ГТУ, что позволило зафиксировать горизонтальными линиями 5–8 и 4–6 процесс утилизации сбросного тепла газовой турбины в цикле ПТУ: разность h_4-h_5 равна разности h_6-h_9 .

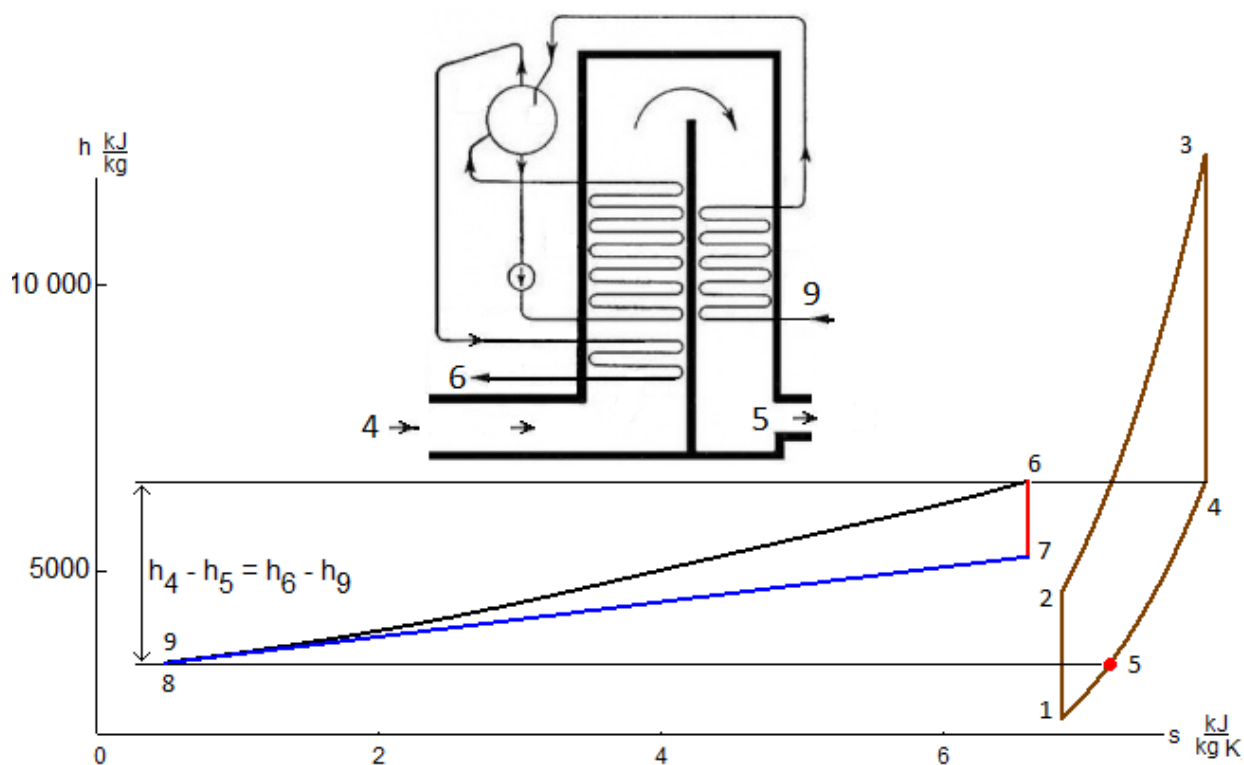


Рис. 5. h_s «живая» диаграмма бинарного цикла ПГУ с увеличенным масштабом цикла ГТУ

Еще более информативной будет диаграмма цикла ПТУ, если ее с масштабированием и сдвигом построить в координатах температура–энтальпия – см. рис. 6, где помимо потока утилизируемой энергии (вертикальные линии 5–8 и 4–6) показан температурный график котла-утилизатора (противоточного теплообменника) с фиксацией ошибки в нашем расчете парогазового цикла. На диаграмме рисунка 6 видна так называемый pinch point – точка, вернее, участок с «опрокинутым» теплообменом. Это явление и другие факторы заставляют проектировщиков парогазовых установок использовать двух и трехконтурные схемы с двумя-тремя барабанами, термодинамический сетевой, открытый и интерактивный расчет которых размещен на авторском сайте <http://tw.t.mpei.ac.ru/ТТНВ/tdc.html> и описан ниже.

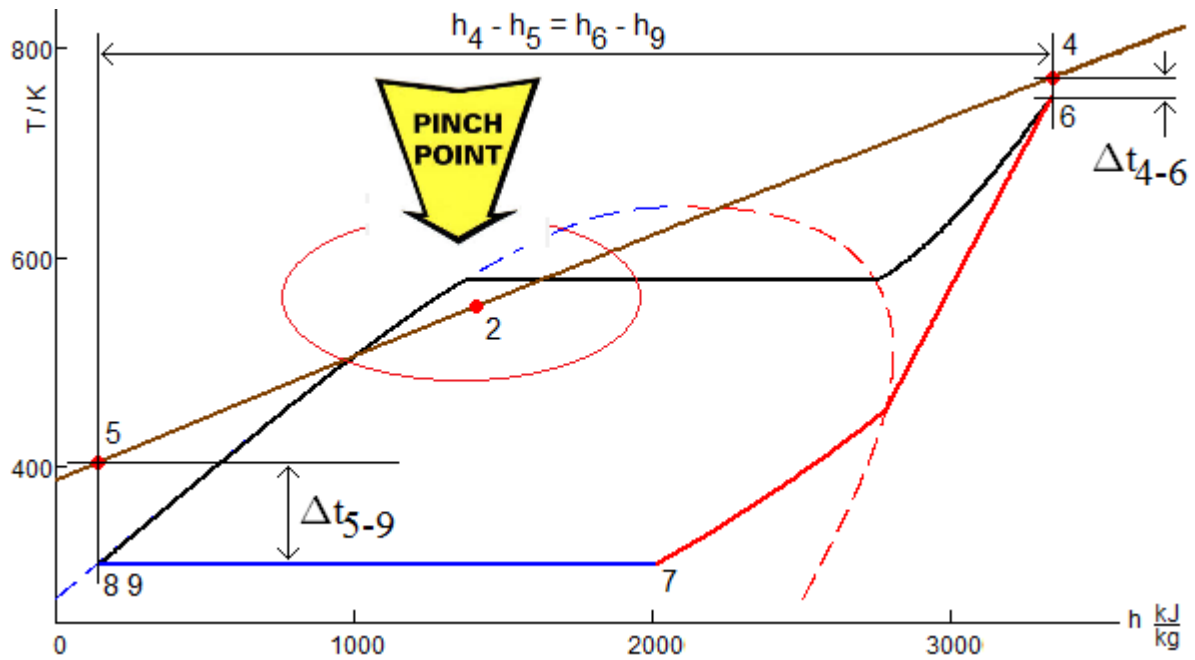


Рис. 6. Th-«живая» диаграмма бинарного цикла ПГУ с увеличенным масштабом сдвинутой диаграммы цикла ГТУ

На рисунках 3 и 4 область диаграммы, отображающая процесс повышения давления в питательном насосе, сжалась в одну точку. В связи с этим эту область пришлось продублировать с изменением масштаба на осях графиков. Альтернативный способ исключающий дублирование графика – это использование трехмерных диаграмм термодинамических циклов, две из которых показаны на рис. 7. Ввод дополнительной оси «давление рабочего тела», позволило «растянуть» точку 8-9 (повышение давления питательной воды) в линию. Дополнительно на диаграммах на рис. 7 показаны линии постоянной степени сухости водяного пара, простирающейся от критической точки до точки 7 (конец процесса расширения пара в турбине).

И еще один важный момент. На рисунке 6 цикл ГТУ выродился в линию, часть которой (с точками 5, 2 и 4) отображена поверх цикла ПГУ. Это связано с тем, что в нашем расчете учитывались свойства не реального рабочего вещества, а идеального газа, у которого энтальпия зависит только от температуры и не зависит от давления. Это «вырождение» цикла ГТУ в линию можно избежать, если перейти к трехмерным диаграммам термодинамических циклов – см. рис. 7.

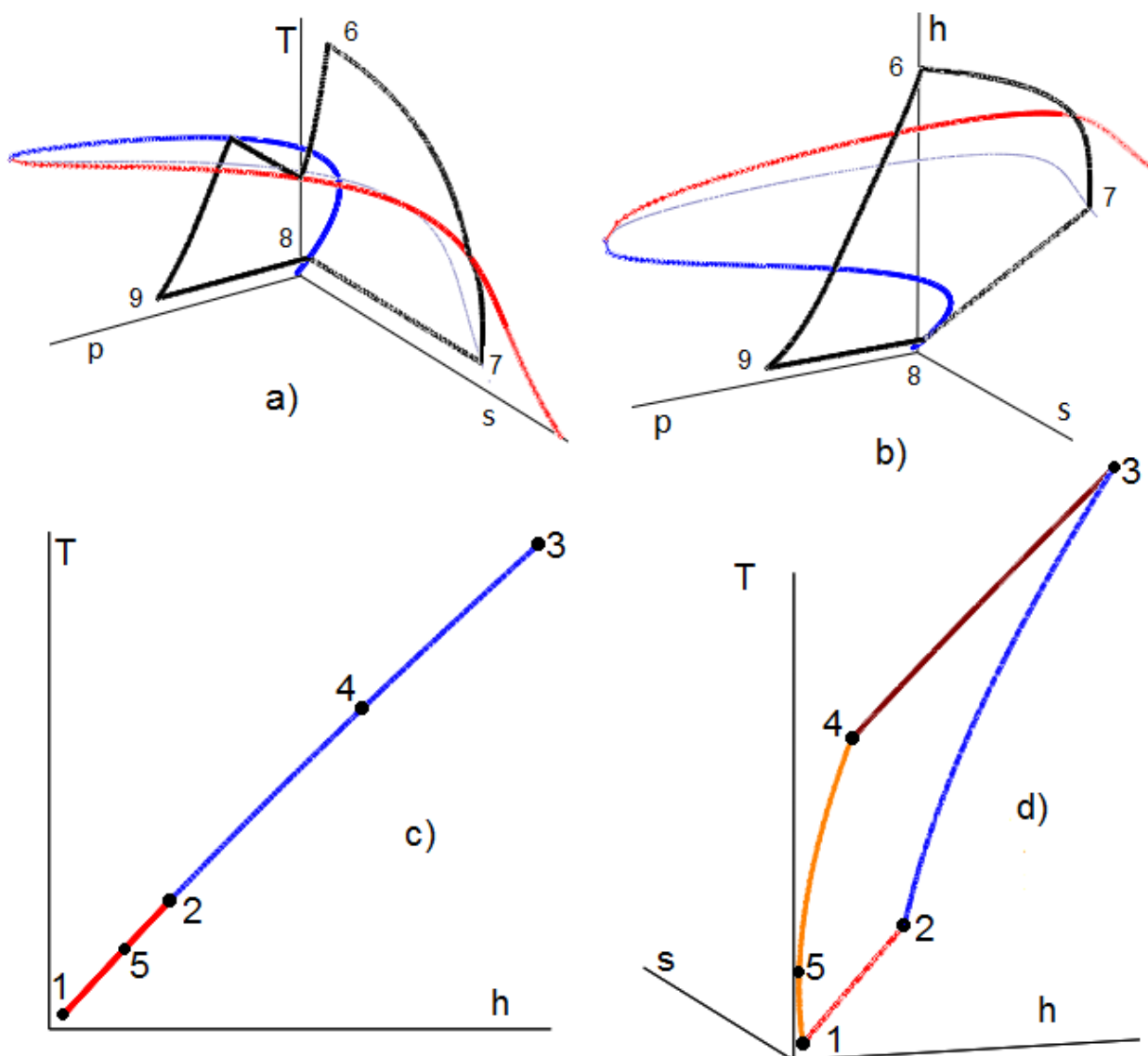
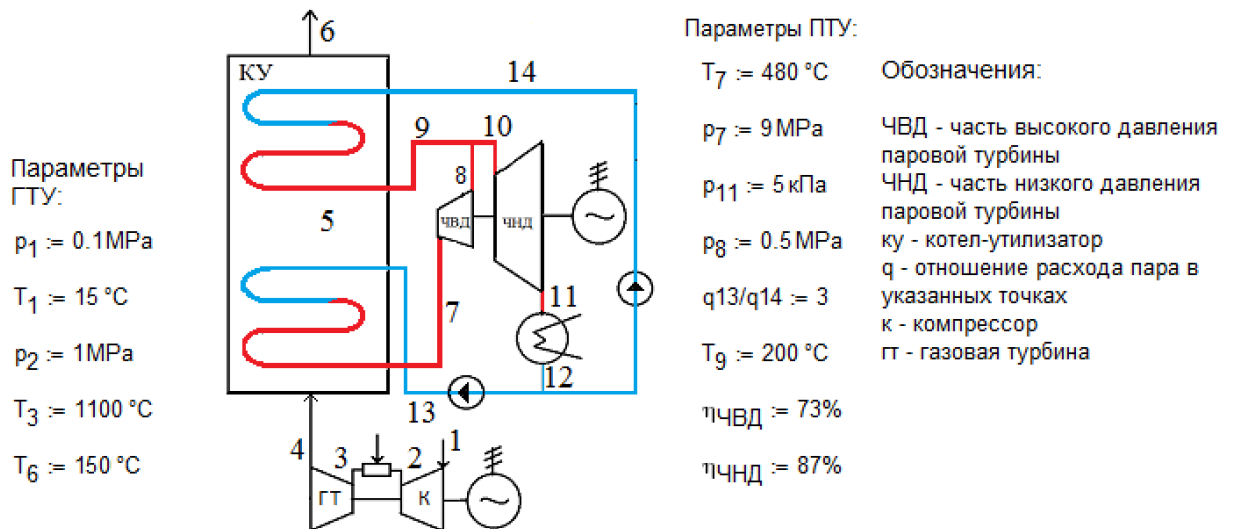


Рис. 7. Трехмерные диаграммы паротурбинного (вверху) и газотурбинного (внизу) циклов: а) Tsp -диаграмма цикла ПТУ на перегретом паре, б) hsp -диаграмма цикла ПТУ, в) Th -диаграмма Цикла ГТУ (третья ось направлена в сторону зрителя) и д) Th -диаграмма цикла ГТУ.

На рисунке 8 показано начало Mathcad-документа с расчетом простейшей двухконтурной ПГУ с циклом с промежуточным перегревом пара. Две половины котла-утилизатора выполнены в виде отдельных барабанных котлов с экономайзерным, испарительным и пароперегревательным участками (см. рис. 1), либо в виде отдельных прямоточных котлов с докритическими или сверхкритическими параметрами. Но это не суть важно. Необходимо рассчитать термический КПД такой установки, построить Th (TQ) диаграмму котла-утилизатора и убедиться, что там нет «опрокидывания» теплообмена, зафиксированного на рис. 6.



Удельная энтальпия воздуха на входе в компрессор:

☐ Reference: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/Gas/M15/wspgHGST.xmcdz>

$$h_1 := \text{wspgHGST}(af, T_1) = 288.56 \text{ кДж/кг газа}$$

Удельная энтропия воздуха на входе в компрессор:

☐ Reference: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/Gas/M15/wspgSGSPT.xmcdz>

$$s_1 := \text{wspgSGSPT}(af, p_1, T_1) = 6.83 \text{ кДж/(кг газа}\cdot\text{K)}$$

Удельная энтропия воздуха на выходе из компрессора:

$$s_2 := s_1 = 6.83 \text{ кДж/(кг газа}\cdot\text{K)}$$

Температура воздуха на выходе из компрессора:

☐ Reference: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/Gas/M15/wspgTGSPS.xmcdz>

$$T_2 := \text{wspgTGSPS}(af, p_2, s_2) = 279.02 \text{ }^\circ\text{C}$$

Удельная энтальпия воздуха на выходе из компрессора:

$$h_2 := \text{wspgHGST}(af, T_2) = 557.39 \text{ кДж/кг газа}$$

Рис. 8. Начало расчета двухконтурной ПГУ: схема установки, ввод исходных данных и вызов облачных функций по свойствам воздуха.

Примечание. В расчете на рис. 8 нет ссылки на «единый» облачный файл Gas.xmcd (см. рис. 1), а делаются ссылки на три облачных файла с расчетами отдельными свойств газа: удельной энтальпии (wspgHGST.xmcd), удельной энтропии (wspgSGSPT.xmcd) и температуры (wspgTGSPS.xmcd). Аббревиатура SG означает спецификацию (S) газа (G). Меняя значение этого аргумента перечисленных функций, можно моделировать состав газа – исходный влажный воздух, природный газ, продукты сгорания и проч. В наших расчетах одно- и двухконтурных ПГУ было сделано допущение, что рабочим телом газовой турбины был сухой воздух (см. оператор af:="Air", на рис. 8), который нагревается в камере сгорания без изменения его состава. Но на вышеотмеченном авторском расчетном сервере есть расчеты ПГУ, где это упрощение не используется.

На рисунке 9 показан один из фрагментов расчета цикла ПТУ двухконтурной ПГУ с такими вычислительными приемами.

Во-первых, не вводится готовая формула для вычисления конкретного параметра, а составляется уравнение материального баланса с параметрами, численные значения которых в расчете не определено: q_g – массовый расход рабочего тела в цикле ГТУ, q_{13} – массовый расход рабочего тела в контуре высокого давления цикла ПТУ и q_{14} – массовый расход рабочего тела в контуре низкого давления цикла ПТУ. К этим переменным нельзя применить *численную* математику пакета Mathcad, но выражения с ними можно преобразовывать *символьно* – решать аналитически, например, уравнения и системы уравнений. А к этому по сути и сводится наша задача, состоящая из уравнений материального и энергетического баланса энергоустановки в целом и по ее отдельным частям. В расчете, повторяем, нет численных значений переменных q_g , q_{13} и q_{14} , но есть численные значения переменной со сложным именем q_{13}/q_{14} и переменной с именем m – отношений расходов рабочих тел на разных участках ПГУ. Такой гибридный подход (сочетание символьной и численной математики) позволяет быстро и безошибочно решать поставленную задачу. В частности, на рис. 9 показано аналитическое решение уравнения энергетического баланса с использованием оператора `solve`. Он выдает численный ответ в случае, если переменные уравнения имеют численные значения. Чтобы получить символьный ответ (не число, а формулу), нужно «заглушить число» операторами `var := var`, спрятанными в скрытых областях на рис. 9. Пример на рис. 9 простой: решение такого уравнения можно осуществить и в уме, стараясь при этом не делать досадных ошибок, вернее, опечаток. Но при расчете трехконтурных ПГУ и других более сложных установок без автоматизации символьных преобразований обойтись будет весьма сложно.

Второй нюанс документа, показанного на рис. 9, состоит в том, что для расчета температуры газов в средней части котла-утилизатора (T_5), не делается ссылка на дополнительную облачную функцию, возвращающую температуру газа в зависимости не от удельной энтропии и давления, а от удельной энтальпии. В расчете используется уже вызванная функция `wspgHGST`, по которой решается обратная задача нахождения нуля выражения, что делается с помощью встроенной в Mathcad функции `root` методом половинного деления.

Комментарий. Задача создания обратных функций по теплофизическим свойствам веществ, волнует многих программистов, заставляет их идти на очень сложные и хитрые приемы. При этом забывается, что современные математические программы имеют мощные средства решения уравнений и их систем, что существенно

упрощает задачу и что мы проиллюстрировали на рис. 9: есть «прямая» функция, по которой несложно провести численное нахождение корня уравнения.

При расчетах цикла ПТУ рассматриваемой ПГУ можно также не делать ссылку на «общий» облачный файл с именем H2O.xmcd (см. рис. 1), а делать ссылки на отдельные файлы с отдельными свойствами воды и водяного пара.

Расчет ПГУ (бинарного цикла)

Удельная энтальпия газа на выходе из котла-утилизатора: $h_6 := \text{wspgHGST}(af, T_6) = 419.73 \text{ кДж/кг газа}$

Часть теплоты выхлопа газовой турбины тратится на выработку пара в котле-утилизаторе

Исходное уравнение $q_T \cdot (h_4 - h_6) = (h_7 - h_{13}) \cdot q_{13} + (h_9 - h_{14}) \cdot q_{14}$

Делим на величину q_{14} $\frac{q_T}{q_{14}} \cdot (h_4 - h_6) = (h_7 - h_{13}) \frac{q_{13}}{q_{14}} + (h_9 - h_{14}) \frac{q_{14}}{q_{14}}$

Делаем замену $q_{13}/q_{14} = \frac{q_{13}}{q_{14}}$ $m = \frac{q_T}{q_{14}}$ $m \cdot (h_4 - h_6) = (h_7 - h_{13}) \cdot q_{13}/q_{14} + (h_9 - h_{14}) \cdot 1$

Решаем уравнение символично

▣ Лишаем переменные их численного значения для символьных преобразований

$$m \cdot (h_4 - h_6) = (h_7 - h_{13}) \cdot q_{13}/q_{14} + (h_9 - h_{14}) \text{ solve, } m \rightarrow \frac{h_9 - h_{14} + q_{13}/q_{14} \cdot (h_7 - h_{13})}{h_4 - h_6}$$

$$m := \frac{h_9 - h_{14} + q_{13}/q_{14} \cdot (h_7 - h_{13})}{h_4 - h_6} = 33.08 \frac{\text{кг газа}}{\text{кг пара}}$$

Температура газов в середине котла-утилизатора (в точке 5)

$$(h_4 - h_5) \cdot q_T = (h_7 - h_{13}) q_{13} \quad (h_4 - h_5) \frac{q_T}{q_{14}} = (h_7 - h_{13}) \frac{q_{13}}{q_{14}} \quad (h_4 - h_5) \cdot m = (h_7 - h_{13}) \cdot q_{13}/q_{14}$$

▣ Лишаем переменные их численного значения для символьных преобразований

$$(h_4 - h_5) \cdot m = (h_7 - h_{13}) \cdot q_{13}/q_{14} \text{ solve, } h_5 \rightarrow \frac{h_4 m - h_7 q_{13}/q_{14} + h_{13} q_{13}/q_{14}}{m}$$

$$h_5 := \frac{h_4 m - h_7 q_{13}/q_{14} + h_{13} q_{13}/q_{14}}{m} = 501.88 \text{ кДж/кг газа} \quad T_5 := \text{root}(\text{wspgHGST}(af, T_5) - h_5, T_5, T_4, T_6) = 225.37 \text{ }^\circ\text{C}$$

Рис. 9. Фрагмент расчета двухконтурной ПГУ: использование символьной математики и создание обратной функции

Символьные преобразования, правда, ручные, а не автоматические ведутся и в заключительной части расчета ПГУ (рис. 10), где определяется термический КПД двухконтурной ПГУ. Для этого составляется соответствующее выражение: числитель – это полезная работа энергоустановки за вычетом работ, затраченных на приводы питательных насосов и компрессора, а знаменатель – подведенная к энергоустановке энергия газа, сжигаемого в камере сгорания. Числитель и знаменатель делятся на

«нечисловую» переменную Q_{14} , что позволяет в формуле для КПД оставить только «числовые» переменные и рассчитать конкретное значение термического КПД.

$$\eta_{\text{ПГУ}} = \frac{(h_3 - h_4)q_{\Gamma} + (h_7 - h_8)q_{13} + (h_{10} - h_{11})(q_{13} + q_{14}) - (h_{13} - h_{12})q_{13} - (h_{14} - h_{12})q_{14} - (h_2 - h_1)q_{\Gamma}}{q_1 q_{\Gamma}}$$

$$\eta_{\text{ПГУ}} = \frac{(h_3 - h_4)\frac{q_{\Gamma}}{q_{14}} + (h_7 - h_8)\frac{q_{13}}{q_{14}} + (h_{10} - h_{11})\left(\frac{q_{13}}{q_{14}} + \frac{q_{14}}{q_{14}}\right) - (h_{13} - h_{12})\frac{q_{13}}{q_{14}} - (h_{14} - h_{12})\frac{q_{14}}{q_{14}} - (h_2 - h_1)\frac{q_{\Gamma}}{q_{14}}}{q_1 \frac{q_{\Gamma}}{q_{14}}}$$

$$\eta_{\text{ПГУ}} = \frac{(h_3 - h_4)m + (h_7 - h_8)q_{13}/q_{14} + (h_{10} - h_{11})(1 + q_{13}/q_{14}) - (h_{13} - h_{12})q_{13}/q_{14} - (h_{14} - h_{12}) - (h_2 - h_1)m}{q_1 m} = 58.47\%$$

Подготовка данных для графика

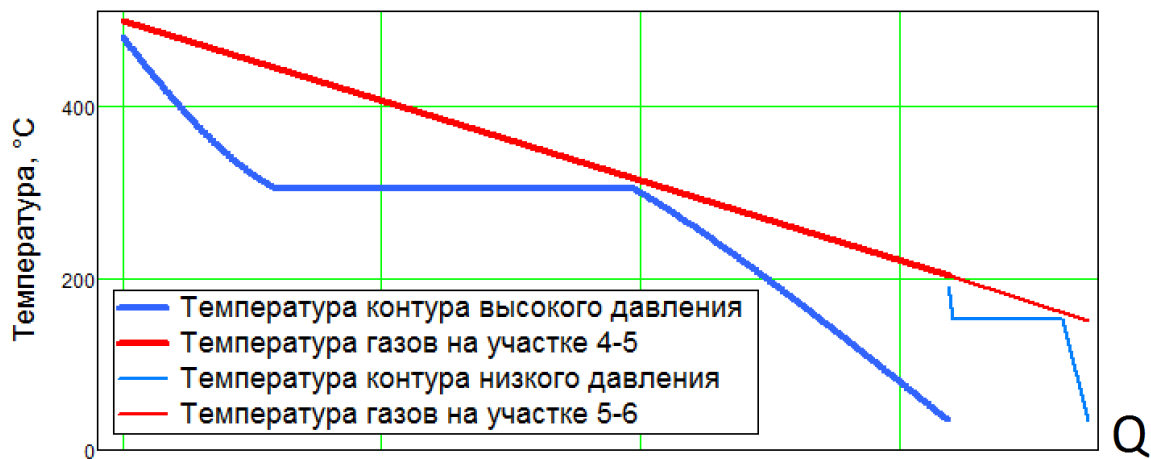


Рис. 10. Завершение расчета двухконтурной ПГУ: расчет термического КПД и построение тепловой диаграммы котла-утилизатора (TQ диаграммы)

Графические средства пакета Mathcad, как уже отмечено выше, позволяют легко и быстро строить различные графики. На рис. 10 построен такой график с экономайзерными испарительными и пароперегревательными участками двух пароводяных трактов (нижние кривые). Из графиков видно, что температурные кривые двух рабочих тел не пересекаются и «pinch-point» (см. рис. 6) отсутствует.

Данная статья написана по итогам выполнения гранта РФФИ № 16-08-01222 Разработка теплофизических основ для Интернет-алгоритмов, ориентированных на оптимизацию комплексных энергоустановок (ГТУ, ПГУ, ПГУ-КУ, ПГУ-ТЭЦ и др.).

Список литературы

1. Трухний, А.Д. Парогазовые установки электростанций: учебник для вузов / А.Д. Трухний. — М.: ОАО «Издательский Дом МЭИ», 2015. — 667 с.
2. Цанев, С.В. Газотурбинные энергетические установки / В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка. — М.: ОАО «Издательский Дом МЭИ», 2011. — 428 с.
3. Ольховский Г.Г. Перспективные газотурбинные и парогазовые установки для энергетики (обзор) / Г.Г. Ольховский // Теплоэнергетика. 2013. № 3.
4. Invernizzi, Costante Mario (2013) Closed Power Cycles: Thermodynamic Fundamentals and Applications. Springer
5. Очков, В.Ф. «Облачный» сервис по свойствам рабочих веществ для теплотехнических расчетов / В.Ф. Очков, К.А. Орлов, М.Л. Френкель, А.В. Очков, В.Е. Знаменский // Теплоэнергетика. 2012. №7. С. 79-86. URL: <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Web-function-Power.pdf>
6. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет / под общ. ред. В. Ф. Очкова. — СПб.: БХВ Петербург, 2015. URL: <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI>.
7. Thermal Engineering Studies with Excel, Mathcad and Internet. Authors: Ochkov, Valery, Orlov, Konstantin, Voloshchuk, Volodymyr. Editor: Rogalev, Nikolay (Ed.). Springer, 2016. URL: <https://www.ptcusercommunity.com/groups/thermal>