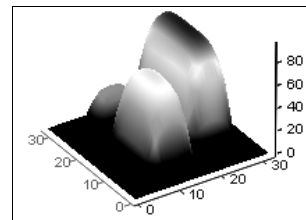


ЭТЮД 14



Расчет парогазового (бинарного) цикла

На рис. 14.1–14.3 показан расчет в среде Mathcad термического КПД простейшего идеального парогазового (бинарного) термодинамического цикла — паротурбинного цикла на перегретом водяном паре. В этой установке горелка котла заменена газотурбинной установкой (цикл Брайтона) с воздушным компрессором (К), камерой сгорания (КС), газовой турбиной (ГТ) и электрическим генератором (Г).

На рис. 14.1 в начале расчета приведена схема парогазовой установки и Ts -диаграммы термодинамических циклов (газотурбинного и пароводяного), в нем задействованных. Эти диаграммы "мертвые" в том смысле, что изменение исходных параметров установки (см. операторы присваивания справа и слева от схемы цикла на рис. 14.1) не приводит к соответствующим изменениям на диаграммах. Но на интернет-сайтах автора <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Rankine.xmcd> (паротурбинный цикл) и <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/GTU.xmcd> (газотурбинный цикл) приведены "живые" диаграммы, меняющие свой вид при изменении исходных параметров циклов. Более того, на сайте паротурбинного цикла можно выбирать оси диаграмм и строить не только двухмерные, но и трехмерные диаграммы, прибавляя, например, к температуре и удельной энтропии давление. Но отобразить на одной "живой" диаграмме два цикла (пароводяной и газовый) сложно из-за того, что у рабочих тел этих циклов (водяной пар и смеси газов) базовые точки по давлению и температуре при подсчете энтальпии и энтропии разные.

Как уже подчеркивалось в *этиюде 1*, расчет термодинамических циклов невозможен без знания свойств рабочих тел, задействованных в этих циклах. Все функции, возвращающие термодинамические свойства воды и водяного пара и необходимые для расчета паротурбинного цикла на перегретом паре, как уже отмечено ранее, собраны на сайте автора www.trie.ru. Эти функции можно скачать с сайта и задействовать их в расчете копированием и вставкой. Эти функции также можно разместить на рабочем компьютере или в локальной компьютерной сети, а затем делать *ссылки* на соответствующие Mathcad-файлы, чтобы эти функции стали *видимыми* в расчетах, что было уже обсуждено. Но можно, повторяем, поступить и так: сделать ссылку не на свой компьютер и не на свою локальную сеть, а на соответствующий сайт.

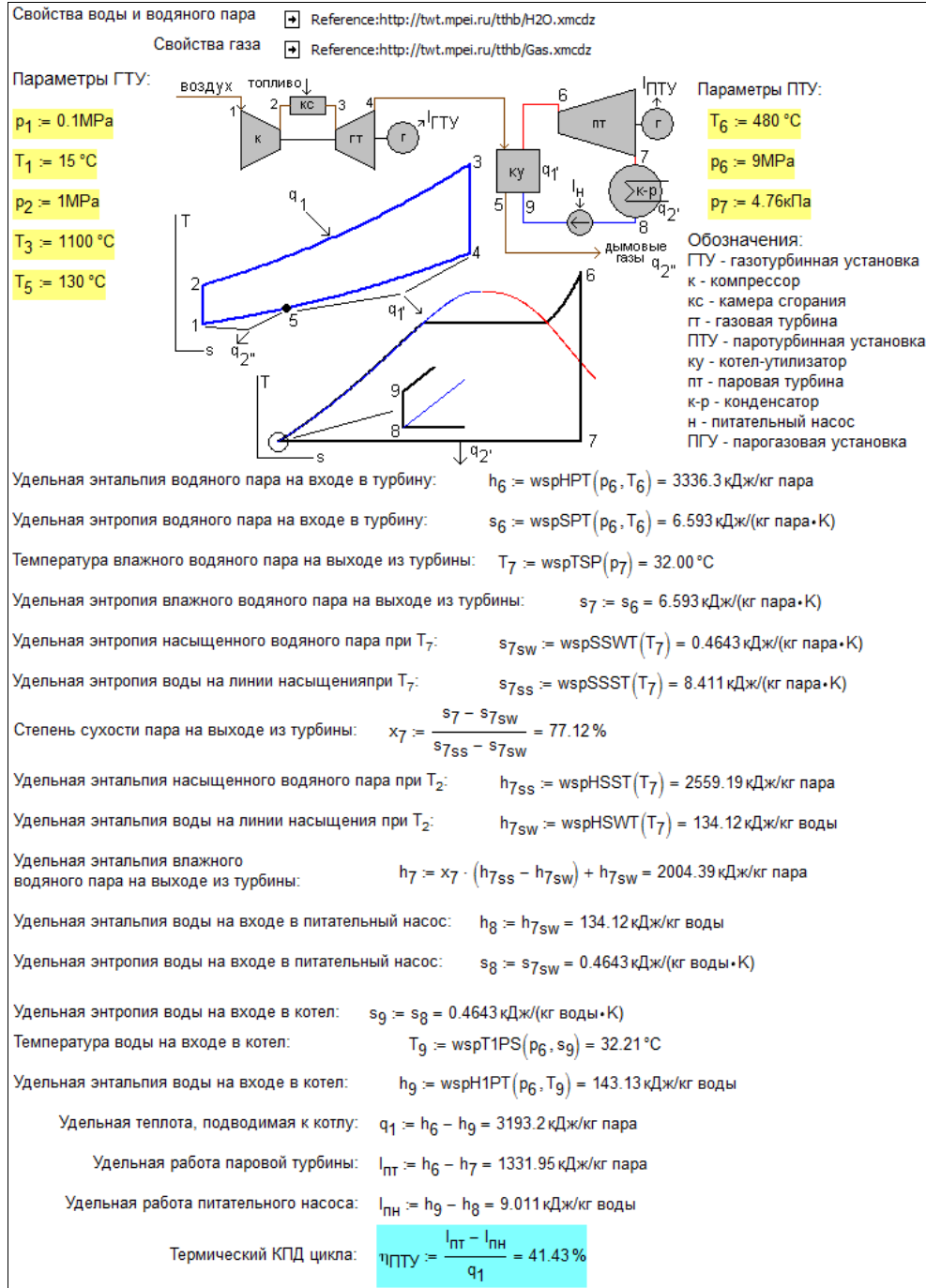


Рис. 14.1. Расчет паротурбинной части парогазового цикла

Расчет ГТУ Рабочее тело af := "Air"

Удельная энтальпия воздуха на входе в компрессор:

Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/fbtp/Gas/M15/wspgHGST.xmcdz> $h_1 := \text{wspgHGST}(af, T_1) = 288.56 \text{ кДж/кг газа}$

Удельная энтропия воздуха на входе в компрессор:

Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/fbtp/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:

Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/fbtp/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: $h_2 := \text{wspgHGST}(af, T_2) = 557.39 \text{ кДж/кг газа}$

Давление газа на входе в ГТУ: $p_3 := p_2 = 1 \text{ МПа}$

Удельная энтропия газа на входе в ГТУ: $s_3 := \text{wspgSGSPT}(af, p_3, T_3) = 7.847 \text{ кДж/(кг газа} \cdot \text{K)}$

Удельная энтальпия газа на входе в ГТУ: $h_3 := \text{wspgHGST}(af, T_3) = 1483.61 \text{ кДж/кг газа}$

Давление газа на выходе из ГТУ: $p_4 := p_1 = 0.1 \text{ МПа}$

Удельная энтропия газа на выходе из ГТУ: $s_4 := s_3 = 7.85 \text{ кДж/(кг газа} \cdot \text{K)}$

Температура газа на выходе из ГТУ: $T_4 := \text{wspgTGSPS}(af, p_4, s_4) = 498.08 \text{ }^\circ\text{C}$

Удельная энтальпия газа на выходе из ГТУ: $h_4 := \text{if}(T_4 > T_6, \text{wspgHGST}(af, T_4), \text{"Error"}) = 790.87 \text{ кДж/кг газа}$

Теплота, подводимая в камере сгорания: $q_1 := h_3 - h_2 = 926.22 \text{ кДж/кг газа}$

Удельная работа газовой турбины: $l_{ГТ} := h_3 - h_4 = 692.74 \text{ кДж/кг газа}$

Удельная работа компрессора: $l_{к} := h_2 - h_1 = 268.83 \text{ кДж/кг газа}$

Термический КПД цикла ГТУ: $\eta_{ГТУ} := \frac{l_{ГТ} - l_{к}}{q_1} = 45.77 \%$

Рис. 14.2. Расчет газотурбинной части парогазового цикла

Расчет ПГУ (бинарного цикла)

Удельная энтальпия газа на выходе из котла-утилизатора: $h_5 := \text{wspgHGST}(af, T_5) = 404.51 \text{ кДж/кг газа}$

Часть теплоты выхлопа газовой турбины тратится на выработку пара в котле-утилизаторе (ку) $m \cdot (h_4 - h_5) = h_6 - h_9$ $m := \frac{h_6 - h_9}{h_4 - h_5} = 8.265 \frac{\text{кг газа}}{\text{кг пара}}$

Удельная теплота, подводимая к ПГУ: $q_1 := m \cdot (h_3 - h_2) = 7655.13 \text{ кДж/кг воды}$

Удельная полезная работа газовой части ПГУ: $l_{ГТУ} := (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) = 423.91 \text{ кДж/кг газа}$

Удельная полезная работа пароводяной части ПГУ: $l_{ПТУ} := (h_6 - h_7) - (h_9 - h_8) = 1322.94 \text{ кДж/кг воды}$

Термический КПД парогазового энергетического блока: $\eta_{ПГУ} := \frac{m \cdot l_{ГТУ} + l_{ПТУ}}{q_1} = 63.05 \%$

где $m = 8.265 \frac{\text{кг газа}}{\text{кг пара}}$ (отношение расхода газа к расходу воды и водяного пара),
 $l_{ГТУ} = 423.913 \text{ кДж/кг газа}$ (удельная работа газовой турбины),
 $m \cdot l_{ГТУ} = 3503.62 \text{ кДж/кг воды}$ (удельная работа газовой турбины на кг воды и водяного пара),
 $l_{ПТУ} = 1322.94 \text{ кДж/кг воды}$ (удельная работа паровой турбины),
 $m \cdot l_{ГТУ} + l_{ПТУ} = 4826.55 \text{ кДж/кг воды}$ (удельная работа газовой и паровой турбины) и
 $q_1 = 7655.13 \text{ кДж/кг воды}$ (удельная теплота, подведенная к ПГУ).

Рис. 14.3. Расчет термического КПД парогазового цикла

Так и было сделано в расчете, показанном на рис. 14.1. Перед расчетом удельной энтальпии h_6 и удельной энтропии s_6 перегретого водяного пара была сделана ссылка на файл H2O.xmcdz, хранящийся на сайте автора. Мы это обсуждали в *этюде 4*, где создавался аналогичный расчет. После такой ссылки в расчете стали видимыми функции по свойствам воды и водяного пара. Файлы и имена функций по свойствам воды и водяного пара, как уже отмечалось, имеют префикс `wsp`.

Аналогичным образом была сделана "облачная" ссылка на файл GAS.xmcdz, где хранятся функции с префиксом `wspg`, возвращающие термодинамические свойства второго рабочего тела нашего бинарного цикла (см. рис. 14.2). Здесь расчет должен быть более сложным. Дело в том, что первое рабочее тело (вода и водяной пар) в процессе своего обращения в цикле меняет только свои параметры и фазовое состояние. Рабочее же тело второго цикла бинарной установки меняет дополнительно свой состав: воздух — смесь воздуха с топливом — дымовые газы. На сайте автора есть расчеты газотурбинных циклов различной степени сложности, учитывающие изменение состава рабочего тела, степень влажности исходного воздуха и другие нюансы. Один из таких расчетов читатель может увидеть на сайте по адресу http://twtmas.mpei.ac.ru/mas/Worksheets/orlov/gases/simple_gtu.mcd и в *этюде 13*. В расчете же, показанном на рис. 14.2, рабочим телом является воздух стандартного состава (см. первый оператор присваивания на рисунке: `af: ="Air"`). В данную строковую константу можно записывать обозначения и других газов (H_2 , N_2 , O_2 и т. д.), а также газовых смесей.

На рис. 14.1 и 14.2 показаны расчеты термических КПД паротурбинного цикла и газотурбинного цикла (цикла Брайтона) в случае, если бы они работали сепаратно с исходными параметрами, показанными в начале рис. 14.1.

На рис. 14.3 представлен расчет термического КПД бинарного цикла (см. его схему на рис. 14.1), где часть тепла выхлопа газовой турбины q_1 тратится в котле-утилизаторе на генерацию из питательной воды (точка 9) острого перегретого пара (точка 6). Контроль за теоретической возможностью этого процесса ведет оператор `if` (если), вставленный в расчет газовой турбины (см. пятую строку снизу на рис. 14.2): температура уходящих газов из газовой турбины T_4 должна быть выше температуры острого водяного пара T_6 , поступающего в паровую турбину. В противном случае переменной h_4 (удельная энтальпия газа, выходящего из газовой турбины) присваивается не численное, а строковое ("Error") значение, что прерывает дальнейший расчет сообщением об ошибке.

На сайте книги представлены расчеты более сложных бинарных циклов, схемы которых приведены в рис. 14.4–14.13. Интернет-адреса расчетов указаны в адресных строках.

Парогазовые установки в российской энергетике внедряются, честно говоря, как "картошка на Руси" — нередко в ущерб традиционным "культурам". Главный инженер одного крупного российского энергообъединения жаловался автору в том плане, что их насильно заставляют строить парогазовый блок на электростанции, где уже давно стоят и прекрасно работают шесть традиционных паротурбинных блоков. На этой электростанции собирались строить седьмой аналогичный блок и

уже соорудили для него фундамент. Но нет! Нужно строить седьмой энергоблок по парогазовой схеме. А это требует создания новых служб — эксплуатационной, ремонтной и т. д., а также сноса уже построенного фундамента. Но самый главный "фокус" тут кроется в том, что никакой особой экономии средств этот новый блок не даст. Да, расход топлива на выработку киловатт-часа электроэнергии снизится за счет более высокого КПД бинарного цикла, но вся эта финансовая выгода уйдет на... оплату очень дорогого по российским меркам сервисного обслуживания газовой энергетической турбины, которую поставляет зарубежная фирма. Да и сама эта турбина очень дорогостоящая, т. к. это штучный продукт, а не продукт массового производства авиационных газовых турбин. А штучный продукт всегда будет дорогим и капризным. Недаром сейчас все чаще и чаще раздаются голоса против использования газовых турбин большой мощности в энергетике.

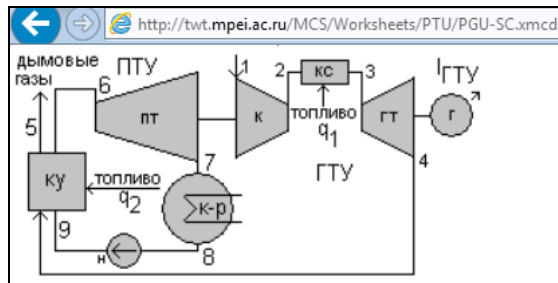


Рис. 14.4. ПГУ с приводом компрессора от паровой турбины

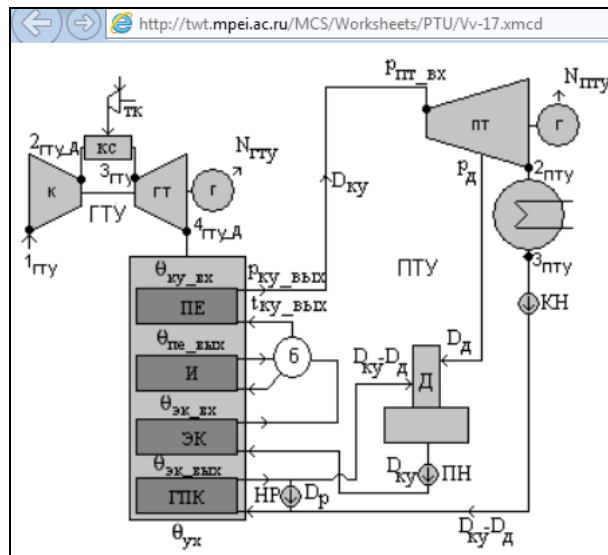


Рис. 14.5. ПГУ с одноконтурным котлом-утилизатором

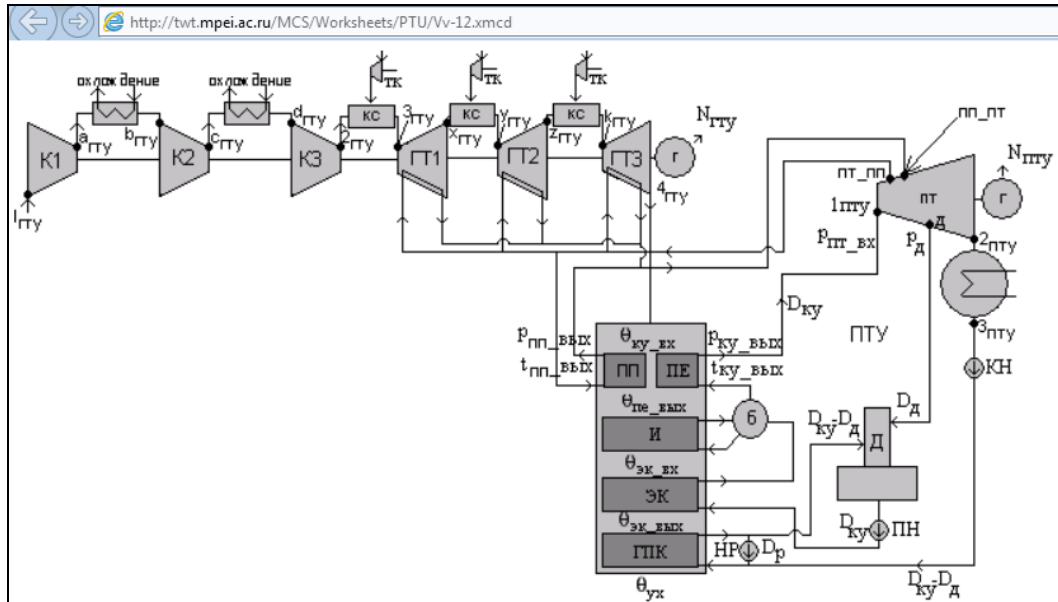


Рис. 14.6. РТУ с одноконтурным котлом-утилизатором, многоступенчатым сжатием воздуха и многоступенчатым подводом тепла

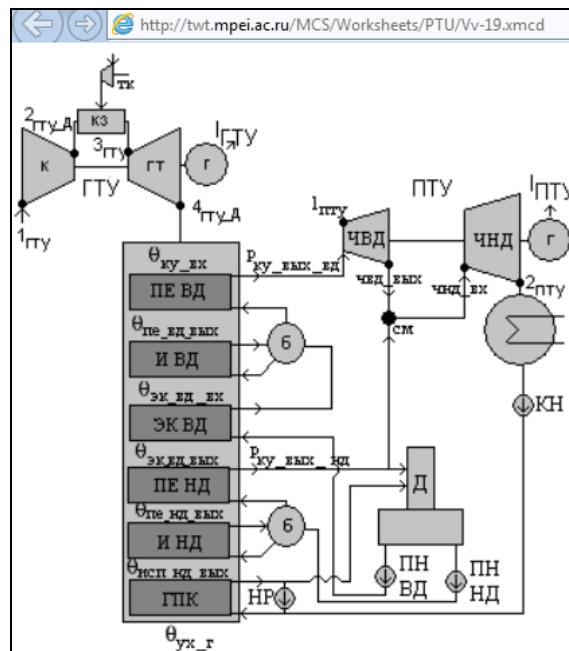


Рис. 14.7. РТУ с двухконтурным котлом-утилизатором

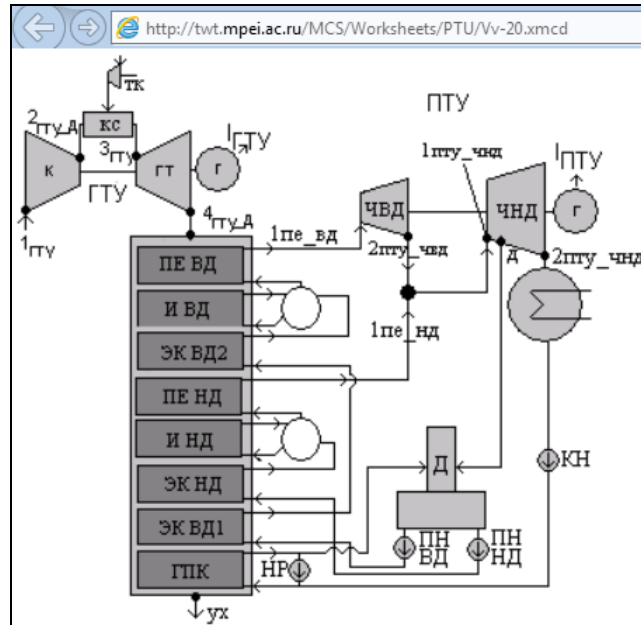


Рис. 14.8. ПГУ с двухконтурным котлом-утилизатором и применением двухступенчатого нагрева питательной воды в экономайзере

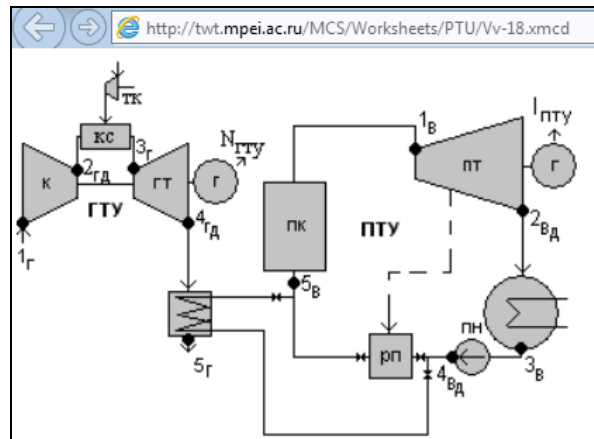


Рис. 14.9. ПГУ с полузависимой схемой (с вытеснением регенерации)

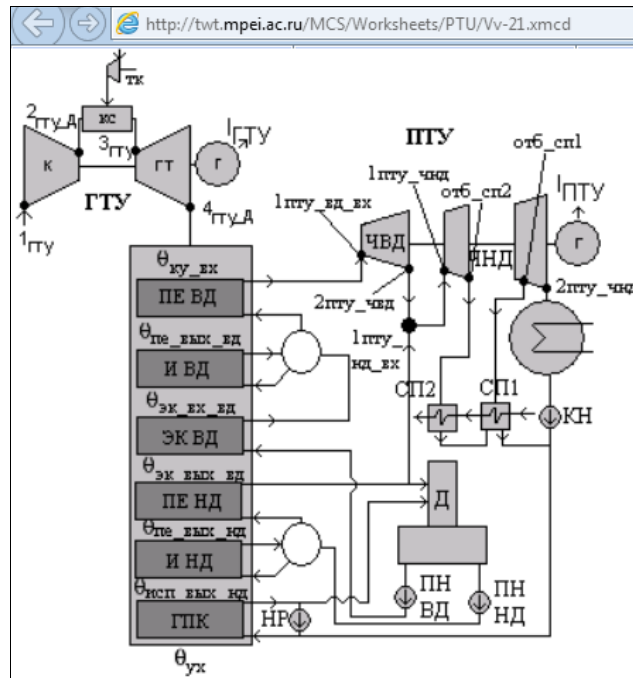


Рис. 14.10. ПГУ с теплофикационной паровой турбиной

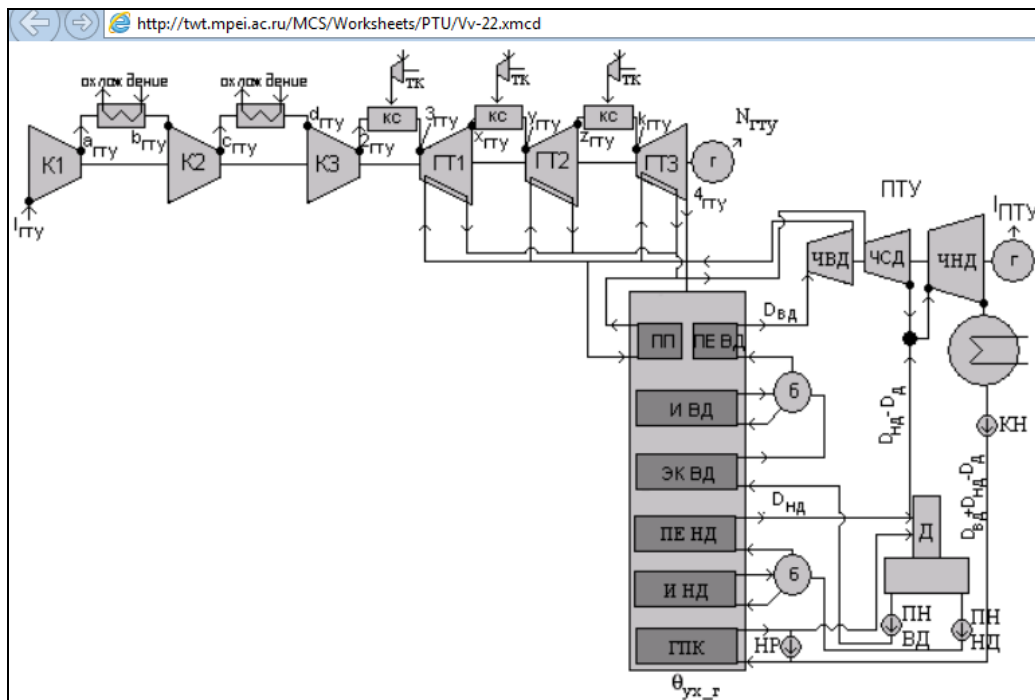


Рис. 14.11. ПГУ с многоступенчатым сжатием воздуха, многоступенчатым подводом тепла и двухконтурным котлом-утилизатором

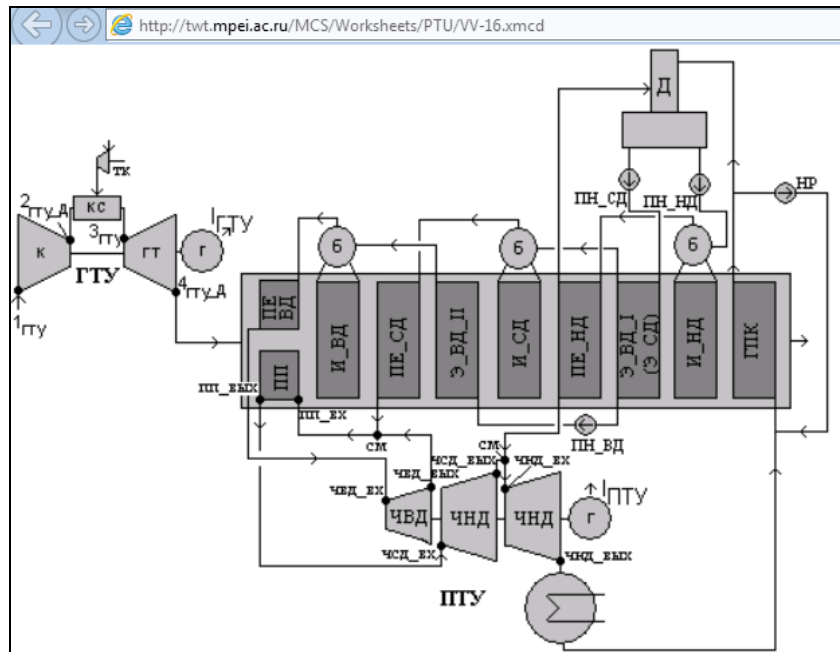


Рис. 14.12. ПТУ с трехконтурным котлом-утилизатором

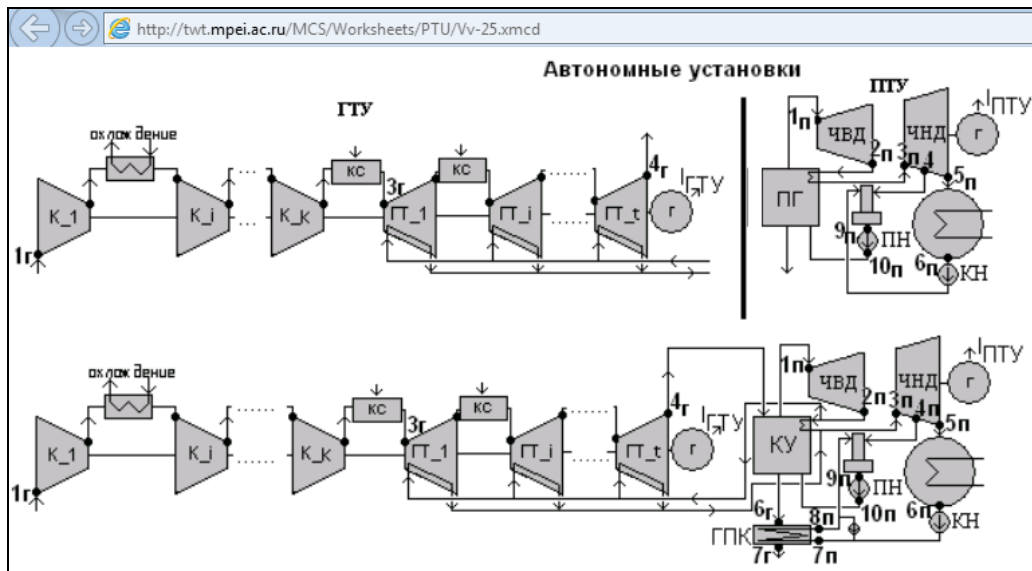


Рис. 14.13. Сравнение ГТУ и ПТУ с ПТУ

Литература

1. Александров А. А., Орлов К. А., Очков В. Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/rbtpp>.
2. Александров А. А., Очков В. Ф., Орлов К. А., Очков А. В. Теплофизические свойства воды и водяного пара в Интернете // Промышленная энергетика. — 2007. — № 2. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WspIn>.
3. Александров А. А., Очков В. Ф., Орлов К. А. Уравнения и программы для расчета свойств газов и продуктов сгорания // Теплоэнергетика. — 2006. — № 3.
4. Очков В. Ф. Теплотехнический справочник в Интернете // Новое в российской электроэнергетике. — 2005. — № 5. URL: http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/VPU_Book_New/mas/NRE_5_5.
5. Очков В. Ф., Утенков В. Ф., Орлов К. А. Теплотехнические расчеты в среде Mathcad // Теплоэнергетика. — 2000. — № 2. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/TE-2-2000.pdf>.
6. Волощук В. А., Очков В. Ф., Орлов К. А. Термодинамическая оптимизация простого бинарного цикла ПГУ с котлом-утилизатором с помощью современных информационных технологий // Вестник Национального технического университета. Харьковский политехнический университет. — 2010. — № 2. — С. 102–106.
7. Орлов К. А., Волощук В. А., Очков В. Ф. Сетевой, интерактивный, открытый расчет газотурбинной энергетической установки // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2010. — № 2. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/GTU-calc.pdf>.
8. Очков В. Ф., Александров А. А., Волощук В. А., Дорохов Е. В., Орлов К. А. Интернет-расчеты термодинамических циклов // Теплоэнергетика. — 2009. — № 1. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/TE-1-2009/P77.png>.
9. Очков В. Ф., Александров А. А., Орлов К. А., Волощук В. А., Очков А. В. Сетевые расчеты процессов и циклов теплоэнергетических установок // Новое в российской электроэнергетике. — 2008. — № 10. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/NREE-2008-2>.
10. Очков В. Ф., Орлов К. А., Знаменский В. Е. Теплотехнические расчеты с опорой на интернет-функции по свойствам рабочих веществ теплоэнергетики // Новое в российской электроэнергетике. — 2011. — № 6. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Ochkov-Znamensky-Web-Rankine.html>.