

УДК 621.1.36.7(035.5)

## НОВЫЕ IT ПРИ РАБОТЕ С ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ РАБОЧИХ ТЕЛ БИНАРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Аунг Ту Ра Тун<sup>1</sup>, асп.; рук .В.Ф. Очков<sup>1</sup>, д.т.н, профессор (НИУ «МЭИ»)

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет “МЭИ”,  
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

В докладе рассмотрены три аспекта ведения теплотехнических расчетов, в частности, бинарных циклов в современных программных средах с открытым, интерактивным, сетевым форматом. Рассматривается подключение к расчетам баз данных по теплофизическим свойствам рабочих тел, работа с физическими величинами, а не только с единицами их измерения и оперирование “живыми” диаграммами термодинамических циклов. Обсуждается технология масштабирования и сдвига плоских и объемных диаграмм бинарных циклов для количественного, а не только качественного графического отображения термодинамических и теплообменных параметров энергоустановок.

занном на рис.1. Весь расчет хранится в Интернете по адресу <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/PGU.xmcdz>.

Свойства воды и водяного пара  Reference:<http://twf.mpei.ru/tthb/H2O.xmcdz>

Свойства газа  Reference:<http://twf.mpei.ru/tthb/Gas.xmcdz>

Параметры ГТУ:

$p_1 = 0.1 \text{ МПа}$

$T_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

$p_2 = 1 \text{ МПа}$

$T_3 = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_5 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$

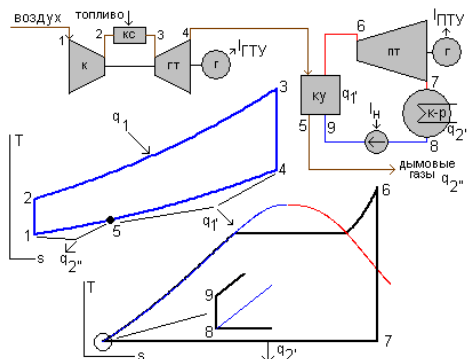
wf := "Air"

Параметры ПТУ:

$T_6 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$

$p_6 = 9 \text{ МПа}$

$p_7 = 4.76 \text{ кПа}$



Удельная энтальпия водяного пара на входе в турбину:

$$h_6 = \text{wsprHPT}(p_6, T_6) = 3336.3 \text{ кДж/кг пара}$$

Удельная энтальпия воздуха на входе в компрессор:

$$h_1 = \text{wsprHGST}(wf, T_1) = 288.56 \text{ кДж/кг газа}$$

Рис. 1. Ссылка на облачную базу данных по свойствам веществ.

Для расчета простейшего идеального парогазового цикла в среде Mathcad 15 (см. начало расчета на рис. 1) были сделаны ссылки на облачные файлы с именами H<sub>2</sub>O и Gas и с расширением xmcd (на Mathcad-документы). После таких ссылок в рабочем документе становятся доступными (видимыми) порядка 50 функций по теплофизическим свойствам двух рабочих тел: воды/водяного пара и воздуха, некоторые используются в расчете, пока-

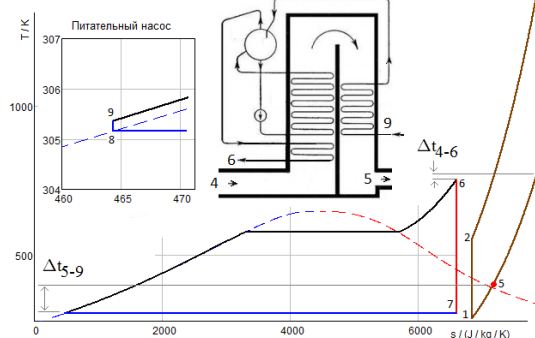


Рис. 2. Исходная Ts «живая» диаграмма парогазового цикла

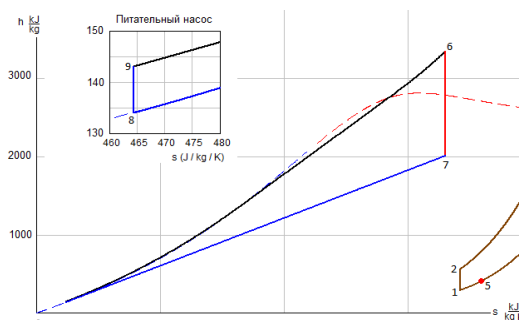


Рис. 3. Исходная hs-диаграмма парогазового цикла

На рисунках 2 и 3 показаны две традиционные «живые» диаграммы: диаграмма докритического цикла на перегретом водяном паре (слева: линии с точками 6, 7, 8 и 9) и диаграмма газотурбинного цикла (справа: линии с точками 1, 2, 3, 4 и 5). На свободных местах диаграмм помещено увеличение участка паротурбинного цикла вблизи питательного насоса и схема одноконтурного котла-утилизатора с экономайзером, испарительной частью и пароперегревателем (примечание: у котла П-образная схема, что не типично для котлов-утилизаторов парогазовых установок; у нас это сделано для повышения компактности рисунка). Читатель может мысленно перенести пароперегреватель в верхнюю часть котла, чтобы получилась некая башенная схема, принятая для ПГУ. Такая компоновка имеет меньшие газодинамические потери.

Одним из главных параметров работы бинарных энергетических установок является величина  $m$  – отношение массового расхода первого теплоносителя к расходу второго теплоносителя.

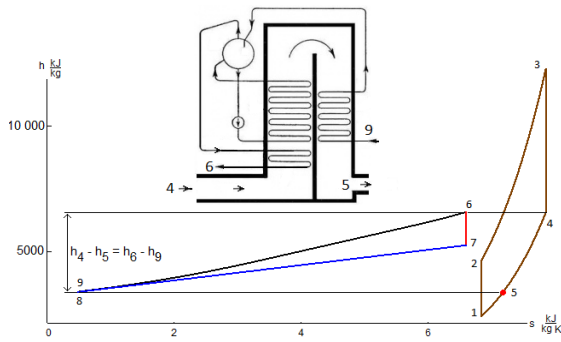
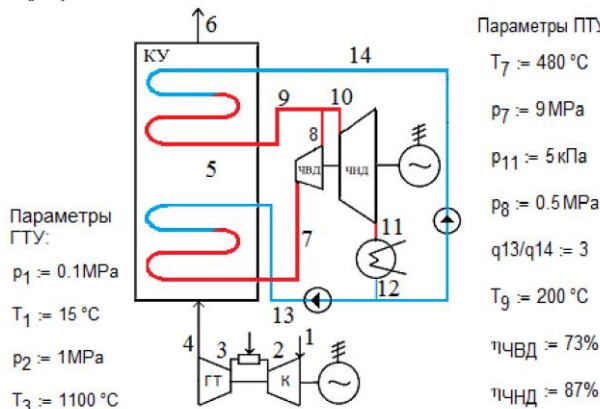


Рис. 3. h-s «живая» диаграмма парогазового цикла с увеличенным масштабом петли газовой турбины

На рисунке 3 традиционная h-s диаграмма показана с увеличением на величину m масштаба цикла газовой турбины, что позволило зафиксировать горизонтальными линиями 5–8 и 4–6 процесс «утилизации сбросного тепла» газовой турбины в паротурбинном цикле: разность  $h_4-h_5$  равна разности  $h_6-h_9$ .



Параметры ПГУ:  
 $T_7 := 480 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $p_7 := 9 \text{ МПа}$   
 $p_{11} := 5 \text{ кПа}$   
 $p_8 := 0.5 \text{ МПа}$   
 $q_{13}/q_{14} = 3$   
 $T_9 := 200 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $\eta_{\text{ЧВД}} := 73\%$   
 $\eta_{\text{ЧНД}} := 87\%$

Параметры ГТУ:  
 $p_1 = 0.1 \text{ МПа}$   
 $T_1 := 15 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $p_2 := 1 \text{ МПа}$   
 $T_3 := 1100 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_6 := 150 \text{ }^\circ\text{C}$

Расчет ГТУ Рабочее тело af := "Air"  
 Удельная энтальпия воздуха на входе в компрессор:

Reference: <http://tw.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://tw.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://tw.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. 5. Начало расчета двухконтурной ПГУ: схема установки, ввод исходных данных и вызов облачных функций по свойствам воздуха.

В расчете на рис. 5 нет ссылки на «единый» облачный файл Gas.xmcd (см. рис. 1), а делаются ссылки на три отдельные облачные файлы с расчетами отдельных 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. 5), который нагревается в камере сгорания без изменения его состава. Но на вышеотмеченном авторском расчетном сервере есть расчеты ПГУ, где это упрощение не используется.

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

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

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



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

Графические средства пакета Mathcad, как уже отмечено выше, позволяют быстро и легко строить различные графики. На рис. 10 построен такой график с экономайзерными испарительными и пароперегревательными участками 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. 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.
3. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет / под общ. ред. В. Ф. Очкова. — СПб.: БХВ Петербург, 2015. URL: <http://tw.twt.mpei.ac.ru/ochkov/TGM>.
4. Очков В.Ф. Физические и экономические величины в Mathcad и Maple (Серия «Диалог с компьютером»). М.: Финансы и статистика. URL: [http://tw.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forward\\_book.htm](http://tw.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forward_book.htm)

Аспирант Аунг Ту Ра Тун (НИУ «МЭИ»)  
 тел: +7 (999) 821 16 77  
 e-mail: [aungthuyatun198@gmail.com](mailto:aungthuyatun198@gmail.com)