

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

## **АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛОВ ГТУ**

*Методические указания для выполнения  
лабораторной работы на ЭВМ  
по курсу «Техническая термодинамика»*

Иваново 2023

Составители: И.М. ЧУХИН  
Д.В. РАКУТИНА

Редактор Е.Н. БУШУЕВ

Содержат основные теоретические положения и методику термодинамического расчета циклов простых и регенеративных схем газотурбинных установок (ГТУ). Приведены практические рекомендации по выполнению лабораторной работы в среде Excel. Приведена методика написания программы для ЭВМ по анализу тепловой экономичности циклов ГТУ. На основании выполненных по данной программе вариантных расчетов проводится анализ влияния параметров рабочего тела на тепловую экономичность цикла ГТУ и осуществляется выбор оптимальных значений степени повышения давления воздуха в компрессоре.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» и 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», изучающих теплотехнические дисциплины.

Утверждены учебно-методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторная работа "Анализ тепловой экономичности циклов ГТУ" предназначена для изучения студентами курса «Теоретические основы теплотехники» или «Техническая термодинамика» по разделу "Циклы газовых двигателей".

Тепловая экономичность циклов ГТУ зависит от большого числа факторов: температур рабочего тела на входе в компрессор и перед газовой турбиной, степени повышения давления воздуха в компрессоре, необратимостей в адиабатных процессах сжатия в компрессоре и расширения рабочего тела в турбине, степени регенерации и т.п.

Выполнение работы осуществляется на ЭВМ в среде Excel. Использование ЭВМ позволяет быстро осуществить вариантыные расчеты показателей термодинамической эффективности ГТУ в широком диапазоне изменения вышеперечисленных величин. На основании этих расчетов проводится анализ тепловой экономичности циклов ГТУ в зависимости от конкретных величин и делаются выводы по выбору оптимальных параметров рабочего тела ГТУ.

Отчет по работе выполняется по специальной тестовой программе «Анализ тепловой экономичности циклов ГТУ».

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1) Расчет в среде Excel показателей тепловой экономичности простого обратимого и необратимого циклов ГТУ в зависимости от параметров рабочего тела ГТУ:

- степени повышения давления воздуха в компрессоре;
- температуры газов перед газовой турбиной;
- температуры воздуха перед компрессором.

2) Выбор оптимальных степеней повышения давления воздуха в компрессоре при различных температурах газов перед турбиной и воздуха перед компрессором для обратимого и необратимого циклов ГТУ.

3) Анализ влияния на оптимальную степень повышения давления воздуха в компрессоре следующих величин: температуры газов перед турбиной, температуры воздуха перед компрессором, необратимостей в адиабатных процессах сжатия и расширения рабочего тела ГТУ.

4) Ручной расчет простого и регенеративного циклов ГТУ для одного из оптимальных значений степени повышения давления воздуха в компрессоре (берется из расчетов на ЭВМ простого цикла ГТУ).

5) Проверка результатов, полученных в ручном расчете простого цикла ГТУ, путем сравнения с соответствующими значениями, найденными в среде Excel.

## 2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Наибольшее применение в энергетике нашли ГТУ с простым разомкнутым циклом (рис. 1).

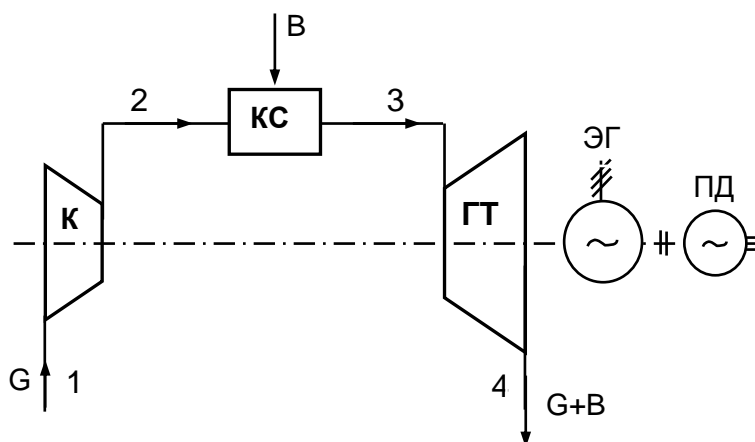


Рис. 1. Схема газотурбинной установки простого разомкнутого цикла: К – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ЭГ – электрический генератор; ПД – пусковой двигатель; G – расход воздуха; B – расход топлива

В таких ГТУ воздух забирается компрессором из атмосферы и после адиабатного сжатия при большом давлении подается в камеру сгорания, где осуществляется изобарное сжигание жидкого или газообразного топлива. Продукты сгорания органического топлива имеют температуру более 2000 °С. При таких высоких температурах металл камеры сгорания может разрушиться, поэтому в камеру сгорания подается в 5 и более раз больше воздуха, чем требуется для сгорания топлива, что позволяет снизить температуру газов и осуществить воздушную защиту металла камеры сгорания. Снижение температуры продуктов сгорания топлива обусловлено не только условием надежной работы металла камеры сгорания, но и требованиями к допустимым значениям температур металла первых ступеней газовой турбины. На сегодня металл газовых турбин способен выдержать температуру 1000 – 1500 °С. Газы с такими температурами на выходе из камеры сгорания применяются на современных ГТУ. Продукты сгорания топлива из камеры сгорания поступают в газовую турбину, где они адиабатно расширяются до давления внешней среды, производя полезную техническую работу. Газовая турбина находится на одном валу с компрессором, поэтому часть работы турбины затрачивается на привод компрессора. Из газовой турбины газы выбрасываются в атмосферу, где они изобарно охлаждаются до температуры внешней среды.

## 2.1. Анализ тепловой экономичности простого цикла ГТУ

Анализ тепловой экономичности ГТУ для упрощения выполняется со следующими допущениями:

1. Свойства рабочего тела ГТУ во всех процессах будем считать соответствующими свойствам идеального двухатомного воздуха с постоянной изобарной теплоемкостью. Это допущение близко к истине, т.к. в продуктах сгорания топлива воздух составляет более 80 %, а свойства атмосферного воздуха близки к свойствам идеального газа.

2. Массовое количество рабочего тела во всех точках процесса будем считать одинаковым и равным количеству воздуха, поступающему в компрессор ( $G$ ). Это допущение объясняется тем, что расход топлива в ГТУ по отношению к расходу воздуха несоизмеримо мал и составляет около 2 %.

3. Условно будем считать цикл ГТУ замкнутым между точками 4 и 1 (рис. 2) по изобарному процессу отвода теплоты от рабочего тела, т.к. газы за ГТУ охлаждаются в окружающей среде при постоянном атмосферном давлении, а воздух в компрессор поступает при том же давлении, поэтому отвод теплоты из цикла ГТУ соответствует изобарному процессу между точками 4 и 1.

В соответствии с вышепринятыми допущениями обратимый (идеальный) цикл ГТУ в  $p,v$ - и  $T,s$ - диаграммах будет представлен на рис. 2.

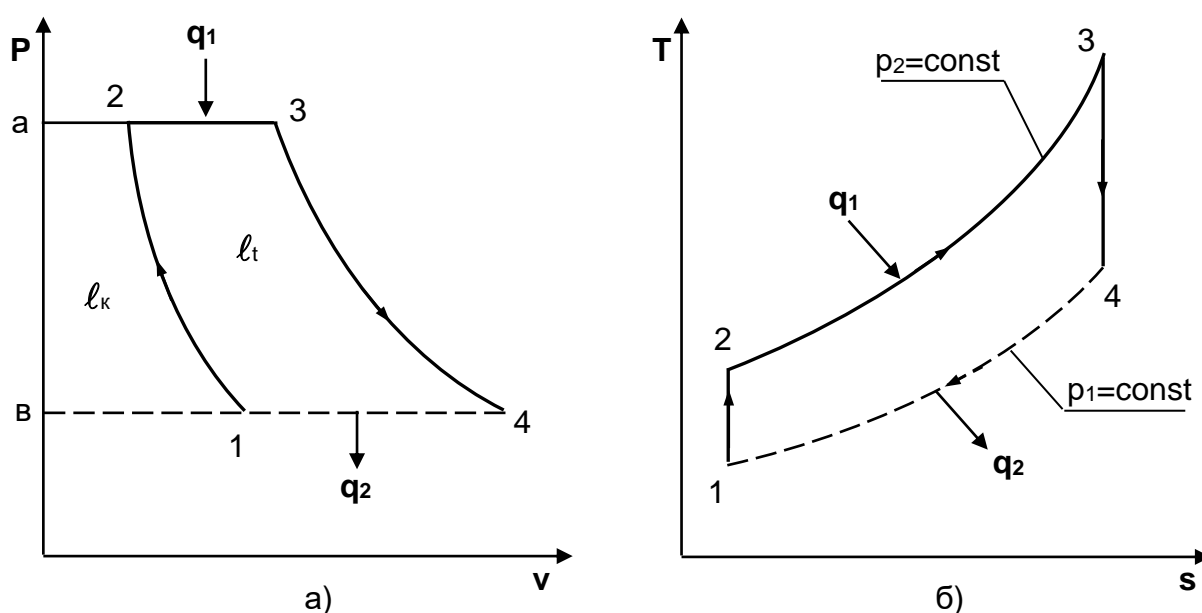


Рис. 2. Идеальный цикл разомкнутой ГТУ: а – в  $P,v$ - диаграмме; б – в  $T,s$ - диаграмме

## Методика расчета тепловой экономичности обратимого цикла ГТУ

Техническая работа обратимого адиабатного процесса сжатия воздуха в компрессоре 1-2 соответствует разности энтальпий этого процесса, а для воздуха со свойствами идеального газа – разности температур, умноженной на изобарную теплоемкость воздуха:

$$l_k = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1). \quad (1)$$

В  $p,v$ - диаграмме работа компрессора может быть представлена площадью под процессом 1-2 в проекции на ось давлений 1-2-а-в-1.

Теплота, подведенная к рабочему телу в камере сгорания, соответствует изобарному процессу 2-3 и рассчитывается как

$$q_1 = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2). \quad (2)$$

В  $T,s$ - диаграмме  $q_1$  соответствует площадь под процессом 2-3.

Технической работе обратимого адиабатного процесса расширения газа в турбине 3-4 соответствует разность энтальпий этого процесса, а для продуктов сгорания топлива со свойствами идеального газа – произведение разности температур на изобарную теплоемкость воздуха:

$$l_{\text{т}} = h_3 - h_4 = c_p(T_3 - T_4). \quad (3)$$

В  $p,v$ - диаграмме работа турбины может быть представлена площадью под процессом 3-4 в проекции на ось давлений 3-4-а-в-3.

Теплота, отведенная от рабочего тела в окружающую среду (изобарный процесс 4-1), рассчитывается как

$$q_2 = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1). \quad (4)$$

В  $T,s$ - диаграмме  $q_2$  соответствует площадь под процессом 4-1.

Работа цикла ГТУ может определяться как разность работ турбины и компрессора или как разность подведенной к рабочему телу и отведенной от рабочего тела теплоты:

$$l_t = l_{\text{т}} - l_k = q_1 - q_2. \quad (5)$$

Необходимо обратить внимание на то, что в ГТУ работа компрессора может составлять до 50 % от работы газовой турбины (рис. 2, а).

Термический КПД цикла ГТУ определяется выражением

$$\eta_t = \frac{l_t}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(\frac{T_4}{T_1} - 1)}{T_2(\frac{T_3}{T_2} - 1)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}, \quad (6)$$

где  $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$ , т.к. для адиабатных процессов 1-2 и 3-4, проходящих в интервале одинаковых давлений  $P_1=P_4$  и  $P_2=P_3$ , справедливы соотношения

$$T_1 \cdot P_1^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = T_2 \cdot P_2^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \quad \text{и} \quad T_3 \cdot P_3^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = T_4 \cdot P_4^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}.$$

После преобразования получим  $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ .

Величину отношения давлений  $v = \frac{P_2}{P_1}$  называют *степенью повышения давления* в компрессоре. Выразив отношение температур через степень повышения давления, получим

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}; \quad (7)$$

$$T_2 = T_1 \cdot v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}; \quad (8)$$

$$T_4 = \frac{T_3}{v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}. \quad (9)$$

С учетом уравнения (7) выражение (6) для расчета термического КПД цикла ГТУ примет вид

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что термический КПД цикла ГТУ зависит только от степени повышения давления воздуха в компрессоре, при этом чем больше степень повышения давления в компрессоре, тем больше термический КПД цикла. Однако это не совсем так.

### 2.1.1. Влияние параметров рабочего тела на тепловую экономичность идеального (обратимого) цикла ГТУ

Поскольку термический КПД цикла ГТУ определяет величина степени повышения давления воздуха в компрессоре ( $v$ ), сначала проведем анализ влияния этой величины на экономичность идеального цикла ГТУ.

Для рассмотрения влияния  $v$  на тепловую экономичность ГТУ примем постоянными температуру и давление воздуха на входе в компрессор ( $T_1=\text{const}$ ,  $P_1=\text{const}$ ) и температуру газов на выходе из



камеры сгорания ( $T_3 = \text{const}$ ). При этих условиях величина  $v$  может иметь значения от 1 до  $v_{\text{max}}$ . Когда  $P_2 = P_1$ ,  $v = 1$ , а  $v = v_{\text{max}}$  при максимальном давлении воздуха за компрессором  $P_{2\text{max}}$ , тогда в результате адиабатного сжатия температура воздуха достигает максимально возможного значения  $T_2 = T_3$  (рис. 3).

При  $v = 1$  работа цикла ГТУ равна нулю, а подведенная к рабочему телу теплота  $q_1$  равна отведенной теплоте  $q_2$ , следовательно, термический КПД цикла равен нулю. При  $v = v_{\text{max}}$  термический КПД цикла ГТУ имеет максимальное значение, т.к.  $T_2 = T_3$ , то в соответствии с уравнением (6) КПД ГТУ в этом случае определяется выражением

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3}.$$

Это выражение аналогично выражению КПД цикла Карно с источниками теплоты  $T_1$  и  $T_3$ . В  $T,s$ - диаграмме при  $v = v_{\text{max}}$  цикл ГТУ представляет прямую вертикальную линию, т.е. получается парадокс: КПД цикла имеет максимальное значение при отсутствии работы цикла ( $l_t = 0$ ).

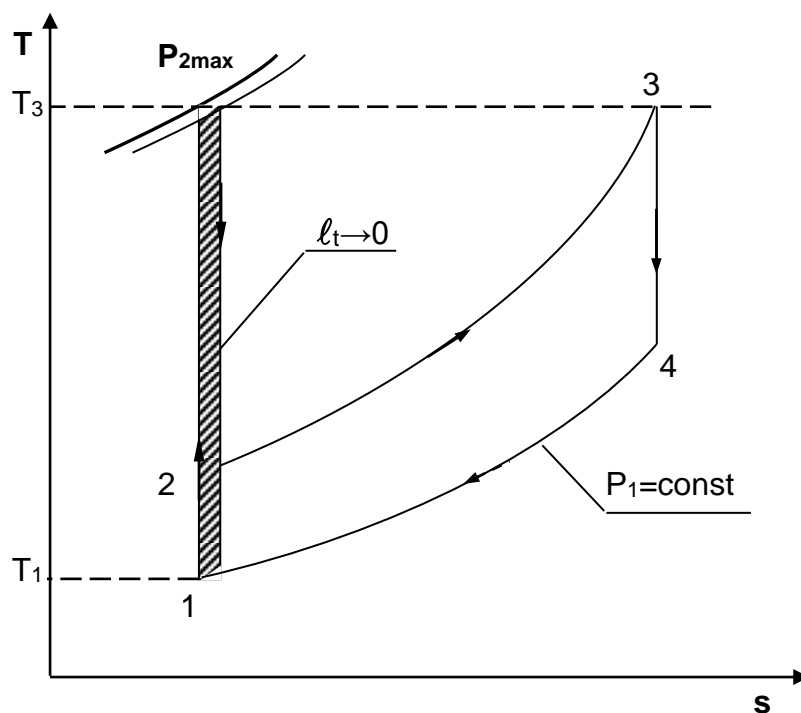


Рис. 3. Анализ влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре на тепловую экономичность идеального цикла ГТУ в  $T,s$ - диаграмме

Объяснение такого явления заключается в равенстве работ компрессора и газовой турбины, т.е. вся работа газовой турбины затрачивается на привод компрессора. Следовательно, экономичность обратимого цикла ГТУ не может оцениваться только термическим

КПД, необходимо учитывать и полезную работу цикла. Графические зависимости изменения термического КПД идеального цикла ГТУ, работ компрессора, газовой турбины и цикла в целом от степени повышения давления  $\nu$  показаны на рис. 4.

В соответствии с этими зависимостями видно, что оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре необходимо выбирать по максимальному значению работы цикла ГТУ. В связи с этим в качестве дополнительного показателя экономичности ГТУ был введен *коэффициент работы*

$$\varphi = \frac{l_t}{l_{\Gamma T}} = \frac{l_{\Gamma T} - l_k}{l_{\Gamma T}} = 1 - \frac{l_k}{l_{\Gamma T}} . \quad (11)$$

По максимальному значению этого коэффициента можно выбрать величину оптимальной степени повышения давления воздуха в компрессоре  $\nu_{\text{опт}}$  для идеального цикла ГТУ.

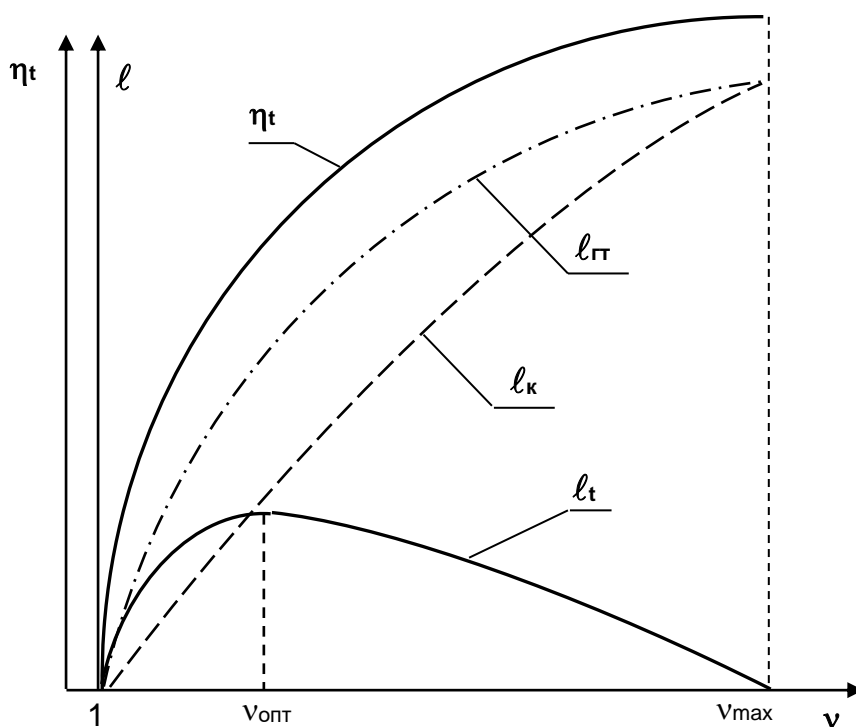


Рис. 4. К анализу влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре на тепловую экономичность идеального цикла ГТУ

Кроме степени повышения давления воздуха в компрессоре на тепловую экономичность идеального цикла ГТУ оказывают влияние температура газов за камерой сгорания  $T_3$  и температура воздуха на входе в компрессор  $T_1$ . При увеличении температуры  $T_3$  увеличи-

ваются значения  $P_{2\max}$  и  $v_{\max}$ , соответственно происходит увеличение максимального значения термического КПД и  $v_{\text{опт}}$ .

Графики зависимости изменения термического КПД идеального цикла ГТУ и работы цикла от степени повышения давления  $v$  при двух значениях  $T_3$  показаны на рис. 5.

Для оценки влияния температур  $T_3$  и  $T_1$  на экономичность ГТУ введен коэффициент отношения этих температур

$$\beta = \frac{T_3}{T_1}. \quad (12)$$

Используя коэффициенты  $v$ ,  $\varphi$  и  $\beta$ , можно выбрать оптимальные параметры рабочего тела для идеального цикла ГТУ.

Заменив коэффициентами  $v$  и  $\beta$  соответствующие отношения температур в выражении работы цикла [1], можно получить выражение *оптимального значения степени повышения давления воздуха* в компрессоре:

$$v_{\text{опт}} = \beta^{\frac{\kappa}{2(\kappa-1)}}. \quad (13)$$

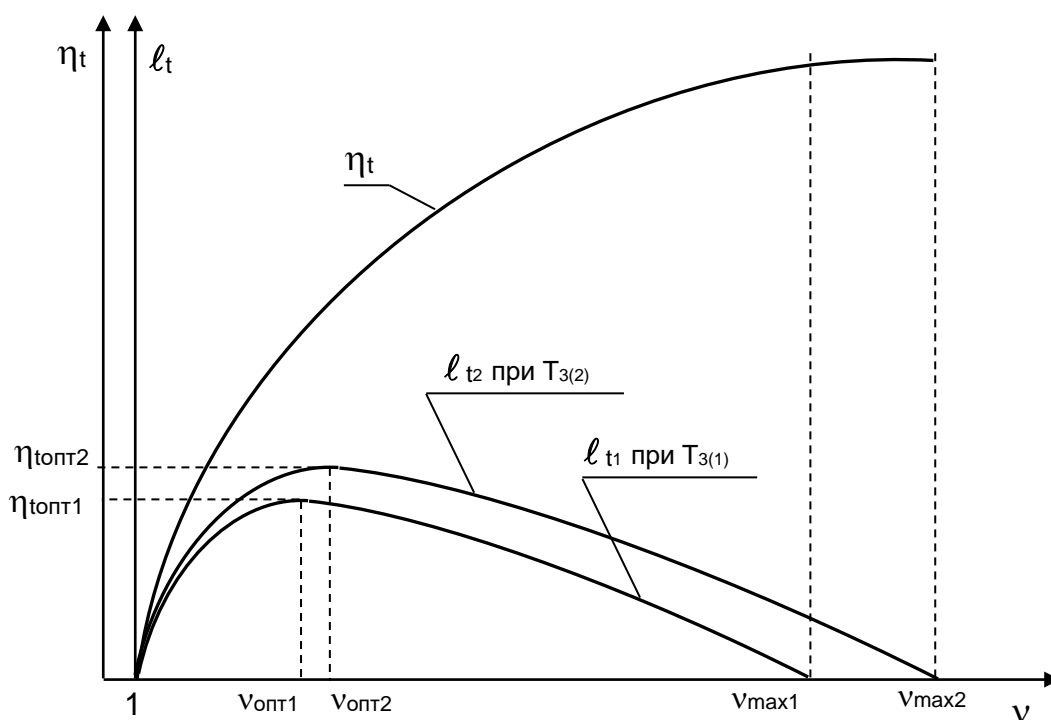


Рис. 5. К анализу влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре и температуры  $T_3$  на тепловую экономичность идеального цикла ГТУ при  $T_{3(2)} > T_{3(1)}$

Поскольку величина  $v_{\text{опт}}$  зависит от коэффициента  $\beta$ , то этот коэффициент и будет определять термодинамическую эффективность идеального цикла ГТУ. Из проведенного анализа следует, что чем больше температура  $T_3$  и меньше  $T_1$ , тем экономичнее идеальный

цикл ГТУ, а оптимальные значения  $v_{\text{опт}}$  и  $\varphi_{\text{опт}}$  определяются отношением температур  $\beta = \frac{T_3}{T_1}$ . Чем больше отношение температур  $\beta$ , тем

больше  $v_{\text{опт}}$ ,  $\varphi_{\text{опт}}$  и соответствующее им значение КПД ГТУ. Значит, надо стремиться к увеличению температуры газов перед турбиной и к снижению температуры воздуха на входе в компрессор. Технологически снижение температуры  $T_1$  невозможно, т.к. это температура окружающей среды. Но вывод о том, что в зимнее время экономичность ГТУ выше, чем в летнее, очевиден.

### 2.1.2. Влияние параметров рабочего тела на тепловую экономичность реального (необратимого) цикла ГТУ

Необратимость в реальном цикле ГТУ характеризуется наличием трения в адиабатных процессах сжатия 1-2' и расширения 3-4' рабочего тела в компрессоре и газовой турбине (рис. 6).

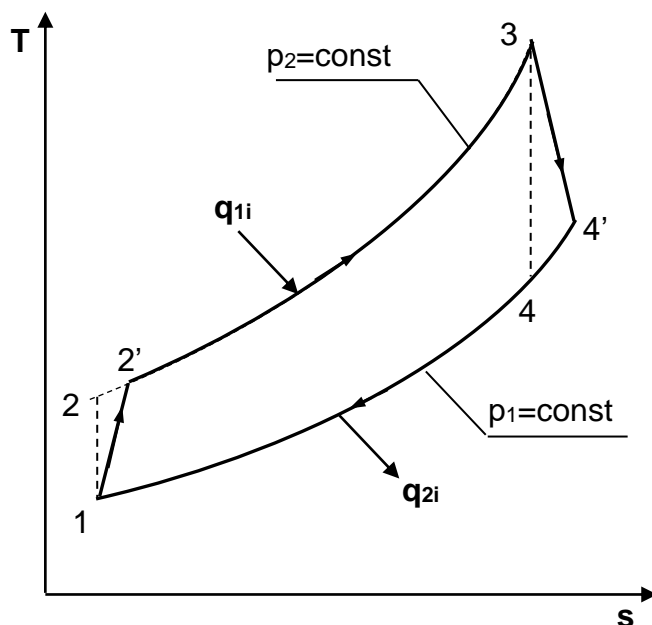


Рис. 6. Реальный цикл разомкнутой ГТУ в T,s- диаграмме

Необратимость адиабатного процесса сжатия в компрессоре характеризует *адиабатный коэффициент* компрессора:

$$\eta_k = \frac{l_k}{l_{ki}} = \frac{c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_{2i} - T_1)} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2i} - T_1}. \quad (14)$$

Необратимость адиабатного процесса расширения газа в турбине характеризует *внутренний относительный* КПД турбины:

$$\eta_{\text{ГТ}} = \frac{l_{\text{ГТ}}}{l_{\text{ГТ}}} = \frac{c_p(T_3 - T_{4i})}{c_p(T_3 - T_4)} = \frac{T_3 - T_{4i}}{T_3 - T_4}. \quad (15)$$

Эти коэффициенты определяются опытным путем для конкретной ГТУ. При расчетах ими пользуются как известными величинами или принимают их на основании справочных данных по ГТУ.

Используя эти коэффициенты, можно рассчитать действительные температуры в конце адиабатных процессов:

$$T_{2i} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_k}; \quad (16)$$

$$T_{4i} = T_3 - \eta_{\text{ГТ}}(T_3 - T_4). \quad (17)$$

Определение работы компрессора и турбины, подведенной и отведенной теплоты к рабочему телу и работы действительного цикла ГТУ ведется аналогично идеальному циклу ГТУ, но с использованием реальных параметров рабочего тела:

$$l_{\text{кi}} = \frac{c_p(T_2 - T_1)}{\eta_k} = c_p(T_{2i} - T_1); \quad (18)$$

$$q_{\text{fi}} = c_p(T_3 - T_{2i}); \quad (19)$$

$$l_{\text{ГТ}} = \eta_{\text{ГТ}} c_p(T_3 - T_4) = c_p(T_3 - T_{4i}); \quad (20)$$

$$q_{2i} = c_p(T_{4i} - T_1); \quad (21)$$

$$l_i = l_{\text{ГТ}} - l_{\text{кi}} = q_{\text{fi}} - q_{2i}. \quad (22)$$

Тепловая экономичность действительного цикла ГТУ на первом этапе анализа характеризуется внутренним абсолютным КПД:

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_{\text{fi}}} = \frac{l_{\text{ГТ}} - l_{\text{кi}}}{q_{\text{fi}}} = \frac{c_p(T_3 - T_4)\eta_{\text{ГТ}} - c_p(T_2 - T_1)\frac{1}{\eta_k}}{c_p(T_3 - T_{2i})}. \quad (23)$$

Преобразовав выражение (23), используя величины  $\nu$  и  $\beta$ , получаем выражение внутреннего абсолютного КПД ГТУ в виде функции от  $\nu$ ,  $\beta$ ,  $\eta_{\text{ГТ}}$ ,  $\eta_k$ :

$$\eta_i = \frac{T_3(1 - \frac{T_4}{T_3})\eta_{\text{ГТ}} - T_1(\frac{T_2}{T_1} - 1)\frac{1}{\eta_k}}{(T_3 - (T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_k}))} = \frac{\frac{T_3}{T_1}(1 - \nu^{\frac{1-k}{k}})\eta_{\text{ГТ}} - \frac{1}{\eta_k}(\nu^{\frac{k-1}{k}} - 1)}{\frac{T_3}{T_1} - (1 + \frac{1}{\eta_k}(\nu^{\frac{k-1}{k}} - 1))} =$$

$$= \frac{\beta(1 - v^{\frac{1-\kappa}{\kappa}})\eta_{ГТ} - \frac{1}{\eta_{\kappa}}(v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1)}{\beta - (1 + \frac{1}{\eta_{\kappa}}(v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1))}. \quad (24)$$

Из уравнения (24) следует, что при неизменных значениях  $\beta$  ( $T_1$ ,  $T_3$ ) и  $\eta_{\kappa}$ ,  $\eta_{ГТ}$  внутренний абсолютный КПД ГТУ зависит от степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$ . Графическая зависимость  $\eta_i$  и  $\ell_i$  от  $v$  при постоянных  $\beta$  и  $\eta_{\kappa}$ ,  $\eta_{ГТ}$  показана на рис. 7.

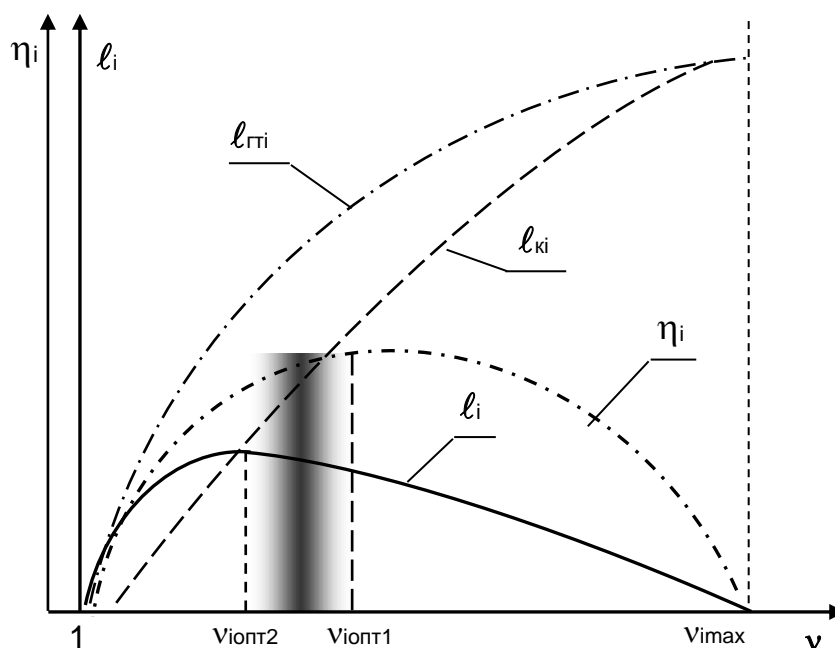


Рис. 7. К анализу влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре на тепловую экономичность реального цикла ГТУ

Из данных графиков видно, что имеются максимумы КПД и работы цикла, которые находятся при разных степенях повышения давления ( $v_{\text{опт1}}$  и  $v_{\text{опт2}}$ ). Оптимальное значение степени повышения давления для реальной ГТУ следует выбирать с учетом ее КПД и максимальной работы цикла, которую характеризует коэффициент работы  $\varphi$ . При этом получается, что  $v_{\text{опт2}} < v_{\text{опт}} < v_{\text{опт1}}$ , а окончательное решение этого вопроса требует технико-экономических расчетов. Так, при дорогом топливе  $v_{\text{опт}}$  будет иметь значение ближе к  $v_{\text{опт1}}$ , а при дешевом — ближе к  $v_{\text{опт2}}$ .

Величину  $v_{\text{опт1}}$ , соответствующую максимальному значению КПД, можно получить, приравняв первую производную выражения (24) к нулю. Выражение  $v_{\text{опт1}}$  является функцией от  $\beta$  и  $\eta_{\kappa}$ ,  $\eta_{ГТ}$  и имеет громоздкое уравнение, которое сложно анализировать. Поэтому более целесообразно проводить анализ зависимости КПД от  $v$  при постоянных значениях величин  $\beta$  и  $\eta_{\kappa}$ ,  $\eta_{ГТ}$  графическим способом.

Величину  $v_{\text{ioпт2}}$ , соответствующую максимальному значению работы цикла, можно получить, приравняв первую производную выражения (22) к нулю, преобразовав его следующим образом:

$$\begin{aligned}
 l_i &= \eta_{\text{ГТ}} l_{\text{ГТ}} - \frac{l_{\text{к}}}{\eta_{\text{к}}} = \eta_{\text{ГТ}} c_p (T_3 - T_4) - \frac{c_p (T_2 - T_1)}{\eta_{\text{к}}} = \\
 &= c_p T_1 \left[ \eta_{\text{ГТ}} \frac{T_3}{T_1} \left( 1 - \frac{T_4}{T_3} \right) - \frac{1}{\eta_{\text{к}}} \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right] = \\
 &= c_p T_1 \left[ \eta_{\text{ГТ}} \beta \left( 1 - v^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \right) - \frac{1}{\eta_{\text{к}}} \left( v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \right]; \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \left( \frac{\partial l_i}{\partial v} \right)_{\beta} &= c_p T_1 \left[ \eta_{\text{ГТ}} \beta \left( \frac{\kappa-1}{\kappa} v^{\frac{1-2\kappa}{\kappa}} \right) - \frac{1}{\eta_{\text{к}}} \left( \frac{\kappa-1}{\kappa} v^{\frac{-1}{\kappa}} \right) \right] = \\
 &= c_p T_1 \frac{\kappa-1}{\kappa} v^{\frac{-1}{\kappa}} \left[ \eta_{\text{ГТ}} \beta v^{\frac{2-2\kappa}{\kappa}} - \frac{1}{\eta_{\text{к}}} \right] = 0;
 \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{ГТ}} \beta v^{\frac{2-2\kappa}{\kappa}} - \frac{1}{\eta_{\text{к}}} = 0 \quad \rightarrow \quad v^{\frac{2-2\kappa}{\kappa}} = \frac{1}{\eta_{\text{к}} \eta_{\text{ГТ}} \beta} \quad \rightarrow \quad v_{\text{ioпт2}} = (\beta \eta_{\text{ГТ}} \eta_{\text{к}})^{\frac{\kappa}{2(\kappa-1)}}. \quad (26)$$

Из выражения (26) видно, что оптимальная степень повышения давления воздуха в компрессоре будет увеличиваться с возрастанием коэффициентов  $\beta$  и  $\eta_{\text{к}}$ ,  $\eta_{\text{ГТ}}$ . При значениях  $\eta_{\text{к}}=1$  и  $\eta_{\text{ГТ}}=1$  выражение (26) преобразуется в уравнение (13) для оптимального значения  $v$  идеального цикла ГТУ. Это свидетельствует о том, что  $v_{\text{ioпт}} > v_{\text{ioпт2}}$ , т.е. в реальном цикле ГТУ оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре меньше, чем в идеальном. При этом с увеличением  $T_3$  и уменьшением  $T_1$  (увеличением  $\beta$ )  $v_{\text{ioпт2}}$  будет увеличиваться.

Аналогично  $v_{\text{ioпт2}}$  изменяется и величина  $v_{\text{ioпт1}}$  в зависимости от коэффициентов  $\beta$  и  $\eta_{\text{к}}$ ,  $\eta_{\text{ГТ}}$ , при этом ее численное значение, оставаясь меньше  $v_{\text{ioпт2}}$ , увеличивается с увеличением  $\beta$ .

Графическая зависимость влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре при двух значениях  $\beta_2 > \beta_1$  на удельную работу и КПД реального цикла ГТУ показана на рис. 8. Из графиков видно, что увеличение  $\beta$  приводит к увеличению оптимальных значений  $v_{\text{ioпт1}}$  и  $v_{\text{ioпт2}}$ , при этом происходит увеличение внутреннего абсолютного КПД ГТУ. Следовательно, для ГТУ всегда целесообразно иметь максимально возможную температуру  $T_3$  и минимальное значение температуры  $T_1$ .

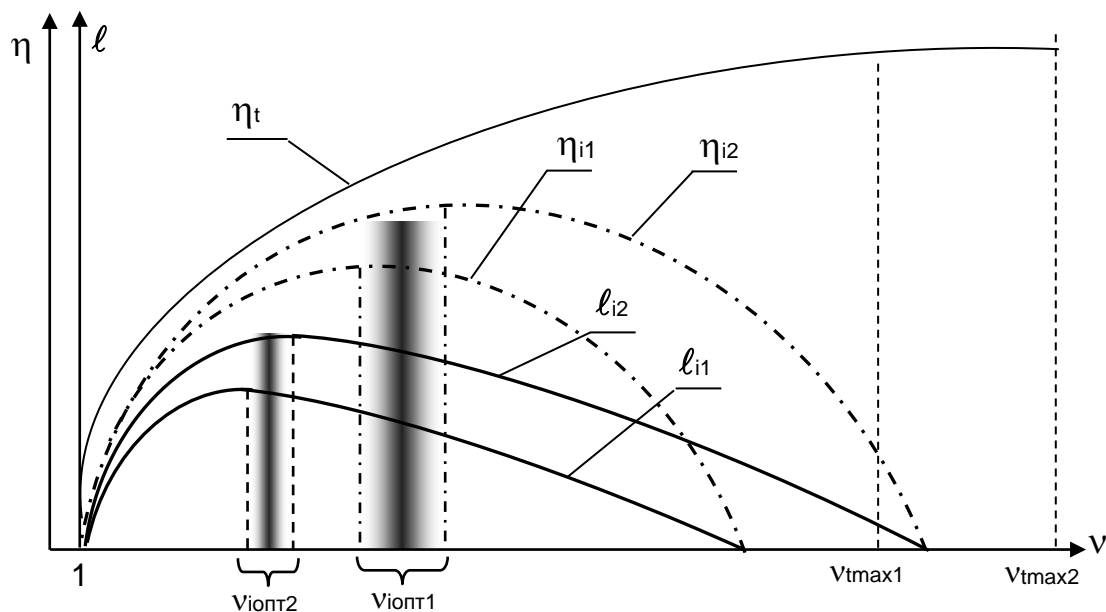


Рис. 8. К анализу влияния  $\beta$  и степени повышения давления воздуха в компрессоре на тепловую экономичность реального цикла ГТУ:  $\beta_2 > \beta_1$ , индекс 1 соответствует  $\beta_1$ , а 2 –  $\beta_2$

В результате анализа экономичности действительного цикла ГТУ можно сделать вывод, что она зависит от следующих величин:  $v$ ,  $\beta$ ,  $\eta_k$ ,  $\eta_{ГТ}$ . При этом оптимальные значения  $V_{ioпт1}$  и  $V_{ioпт2}$  можно получить аналитическим методом, используя уравнения (24) и (26).

Из выражения (24) видно, что оптимальная степень повышения давления воздуха в компрессоре будет увеличиваться с возрастанием коэффициентов  $\beta$  и  $\eta_k$ ,  $\eta_{ГТ}$ . При этом в реальном цикле ГТУ оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре меньше, чем в идеальном, а с увеличением  $T_3$  и уменьшением  $T_1$  (увеличением  $\beta$ )  $V_{ioпт}$  будет увеличиваться (рис. 8).

## 2.2. Регенеративный цикл ГТУ

КПД реального простого цикла ГТУ можно увеличить, используя регенерацию теплоты рабочего тела. В отличие от замкнутых циклов (например, ПТУ), в ГТУ нецелесообразно использование теплоты отборов рабочего тела, а необходимо использовать теплоту всего рабочего тела, выходящего из турбины. Использование теплоты газов из отборов турбины снизит ее мощность при незначительном увеличении КПД. Применение теплоты выходящих из турбины газов для целей регенерации обосновано только в одном месте – за компрессором, для нагрева воздуха, поступающего в камеру сгорания. Установка регенеративного подогревателя перед компрессором или



перед газовой турбиной приведет к снижению коэффициента  $\beta$ , что в свою очередь приведет к уменьшению КПД ГТУ.

Исходя из вышеизложенного схема регенеративной ГТУ будет соответствовать рис. 9.

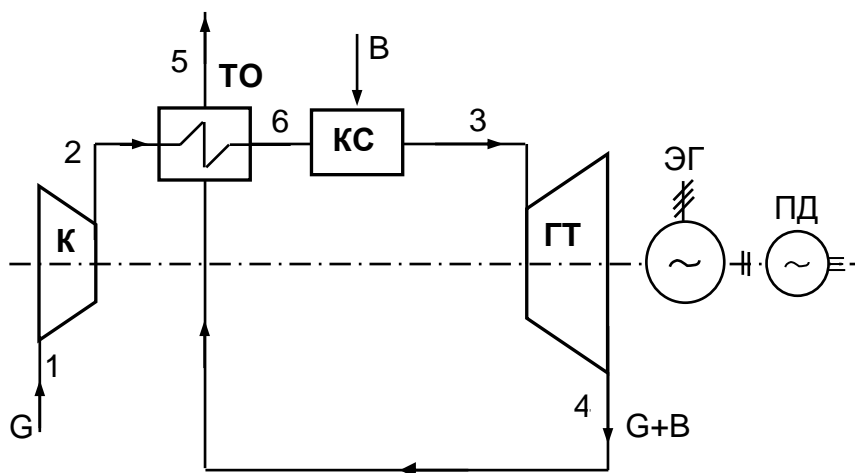


Рис. 9. Схема регенеративной ГТУ разомкнутого цикла: К – компрессор; ТО – теплообменник; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ЭГ – электрический генератор; ПД – пусковой двигатель; G – расход воздуха; B – расход топлива

В регенеративной ГТУ воздух после компрессора поступает в теплообменник (ТО), где он нагревается за счет уходящих газов турбины. Цикл такой ГТУ в  $T,s$ - диаграмме представлен на рис. 10.

Газы, выходящие из турбины с температурой  $T_{4i}$ , теоретически могут быть охлаждены в регенеративном теплообменнике до температуры выходящего из компрессора воздуха  $T_{2i}$ . Однако в соответствии со вторым законом термодинамики для передачи теплоты от газов воздуху необходимо наличие разности температур между ними. Поэтому газы охлаждаются в ТО до температуры  $T_5 > T_{2i}$ , а воздух нагревается до температуры  $T_6 < T_{4i}$ . В связи с этим данный цикл характеризуется величиной, которая называется *степенью регенерации*:

$$\sigma_p = \frac{q_p}{q_{p\max}} = \frac{c_p(T_{4i} - T_5)}{c_p(T_{4i} - T_{2i})} = \frac{c_p(T_6 - T_{2i})}{c_p(T_{4i} - T_{2i})}, \quad (27)$$

где  $q_p = c_p(T_{4i} - T_5) = c_p(T_6 - T_{2i})$  – теплота регенерации;

$q_{p\max} = c_p(T_{4i} - T_{2i})$  – теплота максимальной регенерации.

Теплота, подведенная к рабочему телу ( $q^{p_{1i}}$ ) и отведенная от него ( $q^{p_{2i}}$ ), в регенеративном цикле ГТУ за счет теплоты регенерации уменьшится по сравнению с теплотой  $q_{1i}$  и  $q_{2i}$  в простом цикле ГТУ:

$$q_{1i}^p = c_p(T_3 - T_6) = c_p(T_3 - T_{2i}) - q_p; \quad (28)$$

$$q_{2i}^p = c_p(T_5 - T_1) = c_p(T_{4i} - T_1) - q_p. \quad (29)$$

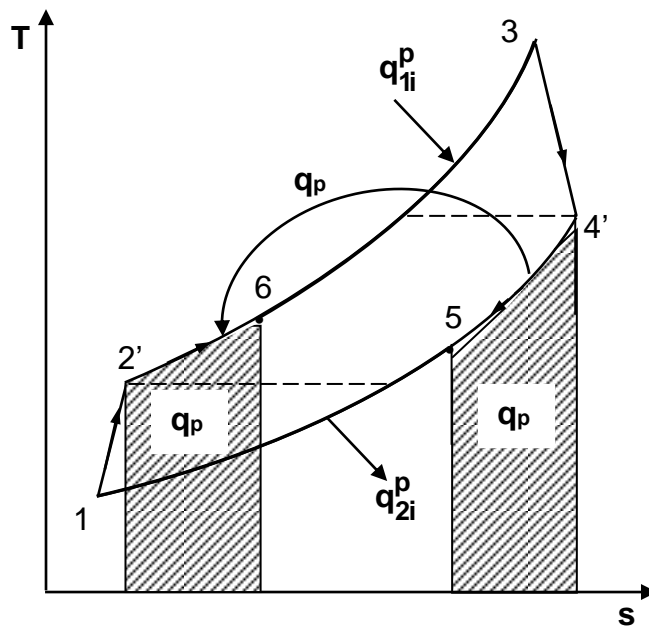


Рис. 10. Действительный регенеративный цикл разомкнутой ГТУ в T,s- диаграмме

Работа газовой турбины и компрессора в регенеративном цикле ГТУ рассчитывается так же, как и в простом цикле:

$$l_{ГТi}^p = c_p(T_3 - T_{4i}); \quad (30)$$

$$l_{Кi}^p = c_p(T_{2i} - T_1). \quad (31)$$

Внутренний абсолютный КПД регенеративной ГТУ всегда больше, чем у аналогичной простой ГТУ, т.к. работы циклов у них одинаковые, а  $q_{1i}^p < q_{1i}$ :

$$\eta_i^p = \frac{l_{ГТi}^p - l_{Кi}^p}{c_p(T_3 - T_{2i}) - q_p} > \eta_i = \frac{l_{ГТi} - l_{Кi}}{c_p(T_3 - T_{2i})}. \quad (32)$$

Экономичность регенеративной ГТУ определяется оптимальным значением степени повышения давления  $v_{опт}^p$  и коэффициентами  $\beta$ ,  $\eta_{ГТ}$  и  $\eta_{К}$ . Увеличение коэффициентов  $\beta$ ,  $\eta_{ГТ}$  и  $\eta_{К}$  так же, как и в простом цикле ГТУ, в цикле с регенерацией приводит к увеличению его КПД (рис. 11).

Оптимальное значение степени повышения давления в цикле ГТУ с регенерацией  $v_{опт}^p$  отличается от значения  $v_{опт}$  простого цикла ГТУ (рис. 11). Максимальные значения работ в зависимости от степени повышения давления в компрессоре в этих циклах одинако-

вые. Но численное значение величины  $v_{\text{ioпт}}^p$  для регенеративного цикла будет меньше, чем  $v_{\text{ioпт}}$  в простом цикле ГТУ. Это объясняется смещением максимального значения КПД регенеративной ГТУ в область меньших значений  $v$  по сравнению со значением  $v$  соответствующего максимального КПД аналогичного цикла простой ГТУ. При этом область  $v_{\text{ioпт}}^p$  смещается в сторону меньших значений  $v$  по сравнению с  $v_{\text{ioпт}}$ .

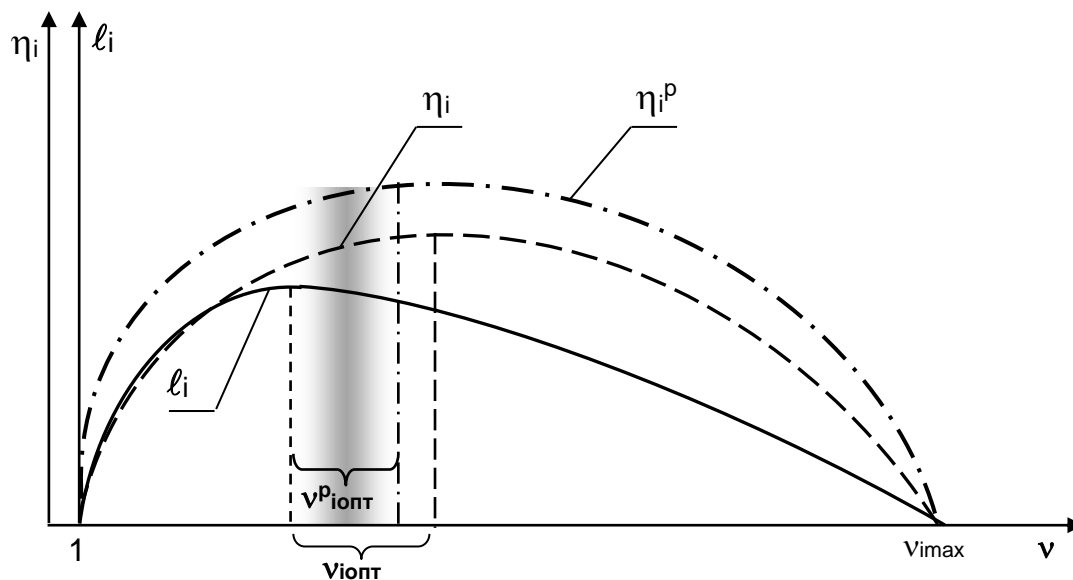


Рис. 11. Зависимость влияния степени повышения давления  $v$  на тепловую экономичность реального простого и регенеративного циклов ГТУ: индекс «р» соответствует регенеративному циклу

### 3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ В СРЕДЕ EXCEL

Расчёт простого обратимого и необратимого циклов ГТУ и анализ их тепловой экономичности выполняется с использованием электронных таблиц Excel. Исходные данные для расчетов принимаются в соответствии с вариантом, заданным преподавателем (Приложение).

Исходные данные включают:

$p_1$  и  $t_1$  – давление и температура воздуха на входе в компрессор;

$t_3$  – температура газов перед газовой турбиной;

$\eta_k$  – адиабатный коэффициент компрессора;

$\eta_{гт}$  – внутренний относительный КПД газовой турбины;

$\Delta t_3$  – абсолютное изменение температуры газов перед газовой турбиной (используется для расчета второго значения температуры  $t_{3(2)} = t_3 + \Delta t_3$  при выполнении анализа влияния температуры  $t_3$  на тепловую экономичность цикла ГТУ);

$\Delta t_1$  – абсолютное изменение температуры воздуха на входе в компрессор (используется для расчета второго значения температуры  $t_{1(2)} = t_1 + \Delta t_1$  при выполнении анализа влияния температуры  $t_1$  на тепловую экономичность цикла ГТУ);

$\sigma_p$  – степень регенерации (используется только для ручного расчета регенеративного цикла ГТУ).

*В качестве рабочего тела принять идеальный двухатомный воздух с постоянной удельной массовой изобарной теплоемкостью  $c_p$  и молярной массой  $\mu=28,96$  кг/кмоль.*

Предварительно выполняется расчет коэффициента Пуассона  $k$  и удельной массовой изобарной теплоемкости  $c_p$ , а также для простого идеального цикла ГТУ – коэффициента  $\beta$  и  $v_{opt}$  по формулам (12) и (13), а для необратимого цикла ГТУ – коэффициента  $\beta$  и  $v_{iopt2}$  по формулам (12) и (26).

Электронные таблицы Excel должны содержать расчет следующих величин (в скобках указан номер расчетной формулы):

1. Для простого идеального (обратимого) цикла ГТУ в диапазоне изменения степени повышения давления воздуха в компрессоре  $\nu$  от 1 до 30 с шагом 1

$T_2$  – температура воздуха на входе в камеру сгорания (8);

$T_4$  – температура газов на выходе из газовой турбины (9);

$l_{гт}$  – удельная техническая работа газовой турбины (3);

$\ell_k$  – удельная техническая работа компрессора (1);

$q_1$  – удельная теплота, подведенная к рабочему телу (2);

$q_2$  – удельная теплота, отведенная от рабочего тела (4);

$\ell_t$  – удельная работа цикла (5);

$\eta_t$  – термический КПД цикла ГТУ (6), (10).

По результатам расчета строятся графики изменения удельной работы цикла ГТУ  $\ell = f(v)$  и термического КПД  $\eta_t = f(v)$  в зависимости от степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$ . На графике  $\ell = f(v)$  показать линии  $\ell_{ГТ} = f(v)$ ,  $\ell_k = f(v)$  и  $\ell_t = f(v)$ .

По максимальному значению удельной работы цикла ГТУ  $\ell_t^{\max}$  в таблице расчетных величин (рис. 12) находят оптимальную степень повышения давления  $v_{\text{опт}}$  в идеальном (обратимом) цикле ГТУ. Строку, соответствующую  $v_{\text{опт}}$ , выделить цветом. Сравнить найденное в таблице значение  $v_{\text{опт}}$  со значением  $v_{\text{опт}}$ , рассчитанным по формуле (13). Сделать вывод о работоспособности формулы (13).

На основании полученных расчетных и графических данных выполнить анализ влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$  на тепловую экономичность обратимого цикла ГТУ и сделать выводы.

Следующий расчет выполняется аналогично вышеизложенному при тех же данных, изменяется только температура газов перед турбиной  $t_{3(2)} = t_3 + \Delta t_3$ . Делается вывод о влиянии  $t_3$  на тепловую экономичность и на оптимальное значение степени повышения давления  $v_{\text{опт}}$  в идеальном (обратимом) цикле ГТУ (сопоставляются  $v_{\text{опт}}$  и соответствующие им удельная работа цикла  $\ell_t$  и КПД ГТУ  $\eta_t$  для двух значений  $t_3$ ).

Далее при неизменных исходных данных исследуется влияние температуры воздуха на входе в компрессор  $t_1$  на тепловую экономичность цикла ГТУ. Расчет выполняется при втором значении температуры  $t_{1(2)} = t_1 + \Delta t_1$ . Делается вывод о влиянии  $t_1$  на тепловую экономичность и на оптимальное значение степени повышения давления  $v_{\text{опт}}$  в идеальном (обратимом) цикле ГТУ (сопоставляются  $v_{\text{опт}}$  и соответствующие им удельная работа цикла  $\ell_t$  и КПД ГТУ  $\eta_t$  для двух значений  $t_1$ ).

2. Для простого реального (необратимого) цикла ГТУ в диапазоне изменения степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$  от 1 до 30 с шагом 1

$T_{2i}$  – действительная температура воздуха на входе в камеру сгорания (16);

$T_{4i}$  – действительная температура газов на выходе из газовой турбины (17);

$\ell_{ггi}$  – удельная техническая работа газовой турбины (20);

$\ell_{ки}$  – удельная техническая работа компрессора (18);

$q_{1i}$  – удельная теплота, подведенная к рабочему телу (19);

$q_{2i}$  – удельная теплота, отведенная от рабочего тела (21);

$\ell_i$  – удельная работа цикла (22);

$\eta_i$  – внутренний абсолютный КПД цикла ГТУ (23).

По результатам расчета строятся графики изменения удельной работы цикла ГТУ  $\ell_i = f(v)$  и внутреннего абсолютного КПД  $\eta_i = f(v)$  в зависимости от степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$ . На графике  $\ell_i = f(v)$  показать линии  $\ell_{ггi} = f(v)$ ,  $\ell_{ки} = f(v)$  и  $\ell_i = f(v)$ . На графике  $\eta_i = f(v)$  построить также линию термического КПД  $\eta_t = f(v)$ . Сделать вывод о влиянии степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$  на КПД необратимого цикла ГТУ.

По максимальному значению внутреннего абсолютного КПД цикла  $\eta_i^{\max}$  в таблице (рис. 24) находят оптимальную степень повышения давления  $v_{i\text{опт}1}$  в реальном (необратимом) цикле ГТУ. По максимальному значению работы цикла ГТУ  $\ell_i^{\max}$  выбирают второе оптимальное значение степени повышения давления  $v_{i\text{опт}2}$ . Строки, соответствующие  $v_{i\text{опт}1}$  и  $v_{i\text{опт}2}$ , выделить цветом. Сравнить найденное значения  $v_{i\text{опт}2}$  со значением  $v_{i\text{опт}2}$ , рассчитанным по формуле (26). Сделать вывод о работоспособности формулы (26).

На основании полученных расчетных и графических данных выполнить анализ влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$  на тепловую экономичность необратимого цикла ГТУ и сделать выводы.

Следующий расчет необратимого цикла ГТУ выполняется аналогично вышеизложенному при тех же данных, изменяется только температура газов перед турбиной  $t_{3(2)} = t_3 + \Delta t_3$ . Делается вывод о влиянии  $t_3$  на тепловую экономичность и на оптимальные значения степени повышения давления  $v_{i\text{опт}1}$  и  $v_{i\text{опт}2}$  в реальном (необратимом) цикле ГТУ (сопоставляются  $v_{i\text{опт}1}$  и  $v_{i\text{опт}2}$  и соответствующие им удельная работа цикла  $\ell_i$  и КПД ГТУ  $\eta_i$  для двух значений  $t_3$ ).

Далее при неизменных исходных данных исследуется влияние температуры воздуха на входе в компрессор  $t_1$  на тепловую экономичность необратимого цикла ГТУ. Расчет выполняется при втором значении температуры  $t_{1(2)} = t_1 + \Delta t_1$ . Делается вывод о влиянии  $t_1$  на тепловую экономичность и на оптимальные значения степени по-

вышения давления  $v_{\text{ioпт1}}$  и  $v_{\text{ioпт2}}$  в реальном (необратимом) цикле ГТУ (сопоставляются  $v_{\text{ioпт1}}$  и  $v_{\text{ioпт2}}$  и соответствующие им удельная работа цикла  $\ell_i$  и КПД ГТУ  $\eta_i$  для двух значений  $t_1$ ).

### 3.1. Пример выполнения лабораторной работы в среде Excel

#### 3.1.1. Расчет простого идеального (обратимого) цикла ГТУ

Расчет в среде Excel начинают с создания табл. 1 (рис. 12) для анализа влияния степени повышения давления  $v$  на тепловую экономичность простого обратимого цикла ГТУ.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	<b>Лабораторная работа "Анализ тепловой экономичности ГТУ"</b>									
2	<b>Вариант № 0</b>									
3	Исходные данные					Расчетные величины				
4	$p_1$ , МПа	$T_1$ , К	$T_3$ , К	$\eta_k$	$\eta_{\text{т}}$	$k$	$c_{p\text{r}}$ кДж/(кгК)	$\beta$	$v_{\text{ioпт}}$	
5	0,1	273,15	1173,15	1	1	1,4	1,005	4,29	12,8	
6										
7	<b>Таблица 1. Анализ влияния степени повышения давления <math>v</math> (обратимый цикл простой ГТУ)</b>									
8	$v$	$\ell_{\text{гт}}$ , кДж/кг	$\ell_k$ , кДж/кг	$\ell_t$ , кДж/кг	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$\ell_t$ , кДж/кг	$T_2$ , К	$T_4$ , К	$\eta_t$
9	1	0,0	0,0	0,0	904,3	904,3	0,0	273,2	1173,2	0,0000
10	2	211,8	60,1	151,7	844,2	692,5	151,7	333,0	962,4	0,1797
11	3	317,6	101,2	216,4	803,1	586,8	216,4	373,9	857,1	0,2694
12	4	385,5	133,4	252,1	770,9	518,8	252,1	405,9	789,5	0,3270
13	5	434,5	160,2	274,3	744,1	469,8	274,3	432,6	740,7	0,3686
14	6	472,3	183,5	288,8	720,8	432,0	288,8	455,8	703,1	0,4007
15	7	502,7	204,1	298,6	700,2	401,6	298,6	476,3	672,8	0,4265
16	8	528,0	222,7	305,3	681,6	376,3	305,3	494,8	647,6	0,4480
17	9	549,6	239,7	309,8	664,6	354,7	309,8	511,7	626,2	0,4662
18	10	568,2	255,4	312,8	648,9	336,1	312,8	527,4	607,6	0,4821
19	11	584,6	270,1	314,6	634,3	319,7	314,6	541,9	591,3	0,4960
20	12	599,2	283,8	315,4	620,5	305,1	315,4	555,6	576,8	0,5083
21	13	612,3	296,7	315,6	607,6	292,0	315,6	568,4	563,7	0,5195
22	14	624,2	308,9	315,3	595,4	280,1	315,3	580,6	551,9	0,5295
23	15	635,0	320,5	314,5	583,8	269,3	314,5	592,1	541,2	0,5387
24	16	645,0	331,6	313,4	572,7	259,4	313,4	603,2	531,3	0,5471
25	17	654,1	342,2	311,9	562,1	250,2	311,9	613,7	522,2	0,5549
26	18	662,6	352,3	310,3	552,0	241,7	310,3	623,8	513,7	0,5621
27	19	670,5	362,1	308,4	542,2	233,8	308,4	633,5	505,8	0,5688
28	20	677,9	371,5	306,4	532,8	226,4	306,4	642,9	498,5	0,5751
29	21	684,9	380,6	304,3	523,8	219,5	304,3	651,9	491,6	0,5810
30	22	691,4	389,3	302,1	515,0	212,9	302,1	660,6	485,1	0,5865
31	23	697,5	397,8	299,7	506,5	206,8	299,7	669,1	478,9	0,5917
32	24	703,4	406,0	297,3	498,3	201,0	297,3	677,2	473,2	0,5967
33	25	708,9	414,0	294,8	490,3	195,5	294,8	685,2	467,7	0,6014
34	26	714,1	421,8	292,3	482,5	190,2	292,3	692,9	462,5	0,6058
35	27	719,1	429,3	289,8	475,0	185,2	289,8	700,4	457,5	0,6100
36	28	723,8	436,7	287,2	467,6	180,5	287,2	707,7	452,8	0,6141
37	29	728,4	443,8	284,5	460,5	175,9	284,5	714,9	448,3	0,6179
38	30	732,7	450,8	281,9	453,5	171,6	281,9	721,8	443,9	0,6216
39	<b>Максимальное значение <math>\ell_t</math></b>			<b>315,6</b>						

Рис. 12. Пример таблицы в Excel для анализа влияния степени повышения давления  $v$  на тепловую экономичность простого обратимого цикла ГТУ

Верхняя часть табл. 1 с исходными данными заполняется в соответствии с вариантом (Приложение), заданным преподавателем. Температуры  $T_1$  и  $T_3$  необходимо перевести в Кельвины. При расчете простого обратимого цикла ГТУ адиабатный коэффициент компрессора  $\eta_k$  и внутренний относительный КПД газовой турбины  $\eta_{гт}$  не учитываются, поэтому можно в этих ячейках поставить 1 или –.

Далее рассчитываем коэффициент Пуассона  $k$  и удельную массовую изобарную теплоемкость  $c_p$  по формулам для идеального газа

$$k = \frac{i+2}{i}; \quad c_p = \frac{R_\mu}{2 \cdot \mu} (i+2),$$

где  $i$  – число степеней свободы;  $\mu$  – молярная масса, кг/кмоль;  $R_\mu = 8314$  Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная.

В лабораторной работе рабочим телом является воздух, который считаем идеальным двухатомным газом с  $i = 5$  и  $\mu = 28,96$  кг/кмоль.

Коэффициенты  $\beta$  и  $v_{opt}$  находим по формулам (12) и (13). Для этого на листе Excel выбираем нужную ячейку и вводим знак равно (=) в поле расчета. Затем записываем формулу, выбирая курсором нужные ячейки и используя стандартные математические операторы, например сложение (+), вычитание (-), умножение (\*), деление (/) и т.п. После ввода формулы нажимаем Enter. В ячейке появится результат вычислений.

Например, в табл. 1, показанной на рис. 12, для расчета  $\beta$  в ячейку H5 необходимо записать формулу =C5/B5, а для расчета  $v_{opt}$  в ячейку I5 – формулу =H5^(F5/(2\*(F5-1))).

Создаем таблицу для расчета основных характеристик простого обратимого цикла ГТУ в диапазоне изменения степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$  от 1 до 30 с шагом 1. Ввод формул выполняем в следующей последовательности:

- 1) температура воздуха на входе в камеру сгорания  $T_2$  – формула (8);
- 2) температура газов на выходе из газовой турбины  $T_4$  – формула (9);
- 3) удельная техническая работа газовой турбины  $l_{гт}$  – формула (3);
- 4) удельная техническая работа компрессора  $l_k$  – формула (1);
- 5) удельная работа цикла  $l_t = l_{гт} - l_k$ ;
- 6) удельная теплота, подведенная к рабочему телу  $q_1$  – формула (2);
- 7) удельная теплота, отведенная от рабочего тела  $q_2$  – формула (4);
- 8) удельная работа цикла  $l_t = q_1 - q_2$ ;
- 9) термический КПД цикла ГТУ  $\eta_t$  – формулы (6) или (10).



Обратите внимание, что результаты расчета удельной работы цикла  $\ell_t$  двумя способами должны полностью совпадать (это сделано для проверки расчетов).

При вводе формул необходимо создать абсолютную ссылку на исходные данные, тогда при копировании формулы эти данные не изменятся. Для этого можно поставить знак доллара (\$) у соответствующих координат ячейки, но проще это сделать, нажав клавишу F4 после выбора нужной ячейки, при этом знак (\$) появится автоматически. На рис. 13 показан пример создания формулы с абсолютной ссылкой для расчета  $\ell_{ГТ}$ .

Исходные данные		Расчетные величины						
$p_1$ , МПа	$T_1$ , К	$T_3$ , К	$\eta_k$	$\eta_{ГТ}$	$k$	$c_{пр}$ , кДж/(кгК)	$\beta$	$v_{опт}$
0,1	273,15	1173,15	1	1	1,4	1,005	4,29	12,8

$v$	$\ell_{ГТ}$ , кДж/кг	$\ell_k$ , кДж/кг	$\ell_t$ , кДж/кг	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$\ell_t$ , кДж/кг	$T_2$ , К	$T_4$ , К	$\eta_t$	
1	=G\$5*(C\$5-I9)		0,0	904,3	904,3	0,0	273,2	1173,2	0,0000	
2		211,8	60,1	151,7	844,2	692,5	151,7	333,0	962,4	0,1797
3		317,6	101,2	216,4	803,1	586,8	216,4	373,9	857,1	0,2694

Рис. 13. Пример создания формулы с абсолютной ссылкой на ячейку

В результате в строке 9 табл. 1 (рис. 12) должны получиться следующие формулы:

$$\ell_{ГТ} = G\$5 * (C\$5 - I9);$$

$$\ell_k = G\$5 * (H9 - B\$5);$$

$$\ell_t = B9 - C9;$$

$$q_1 = G\$5 * (C\$5 - H9);$$

$$q_2 = G\$5 * (I9 - B\$5);$$

$$\ell_t = E9 - F9;$$

$$T_2 = B\$5 * A9^{((F\$5 - 1) / F\$5)};$$

$$T_4 = C\$5 * A9^{(- (F\$5 - 1) / F\$5)};$$

$$\eta_t = G9 / E9.$$

После заполнения всей строки для  $v = 1$ , копируем формулы этой строки и вставляем для  $v$  от 2 до 30. Для этого левой кнопкой мыши выделяем нужные ячейки и выбираем на вкладке Главная >

Копировать или нажимаем клавиши CTRL+C. Затем выделяем ячейки, в которые нужно вставить эти формулы, и выбираем Главная > Вставить или нажимаем клавиши CTRL+V.

В табл. 1 (рис. 12) находим максимальное значение работы цикла ГТУ  $\ell_t^{\max}$ . Для этого выбираем ячейку D34 и нажимаем кнопку «Вставить функцию»  $f_x$ , расположенную возле строки формул. В появившемся окне (рис. 14) из списка выбираем МАКС и нажимаем ОК. Произойдет запуск окна «Аргументы функции». В поле «Число» следует ввести адреса ячеек, для которых требуется применить данную функцию. Это можно сделать, вписав координаты ячеек вручную, или просто выделив левой кнопкой мыши нужные ячейки таблицы, при этом их координаты тут же отобразятся в поле «Число» (рис. 15).

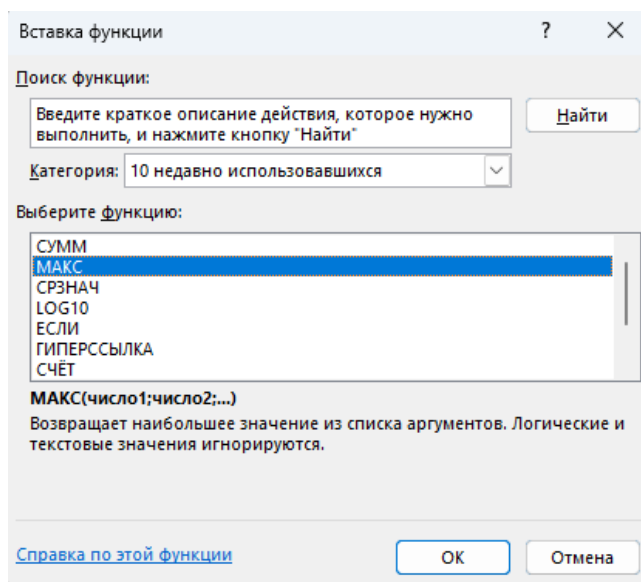


Рис. 14. Окно «Вставка функции»

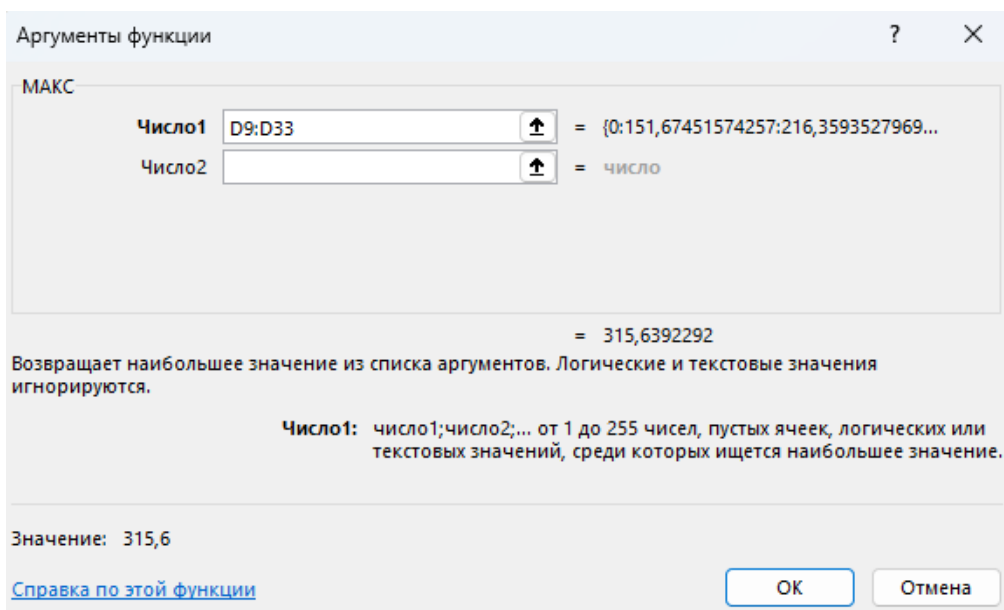



Рис. 15. Окно «Аргументы функции»

Строка с максимальным значением работы цикла будет соответствовать оптимальной степени повышения давления  $v_{\text{опт}}$  в идеальном (обратимом) цикле ГТУ. Эту строку выделяем цветом (рис. 12). Для этого выделяем всю строку левой кнопкой мыши и нажимаем кнопку  в главном меню. Там же можно выбрать цвет заливки.

Найденное значение  $v_{\text{опт}}$  сравниваем с рассчитанным по формуле (13) (ячейка I5). Делаем вывод о работоспособности формулы (13).

По результатам расчета строим графики изменения работы цикла ГТУ  $\ell_t = f(v)$  и термического КПД  $\eta_t = f(v)$  в зависимости от степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$ . Для этого переходим на вкладку «Вставка» и в разделе «Диаграммы» выбираем «Точечная с гладкими кривыми и маркерами» (рис. 16).

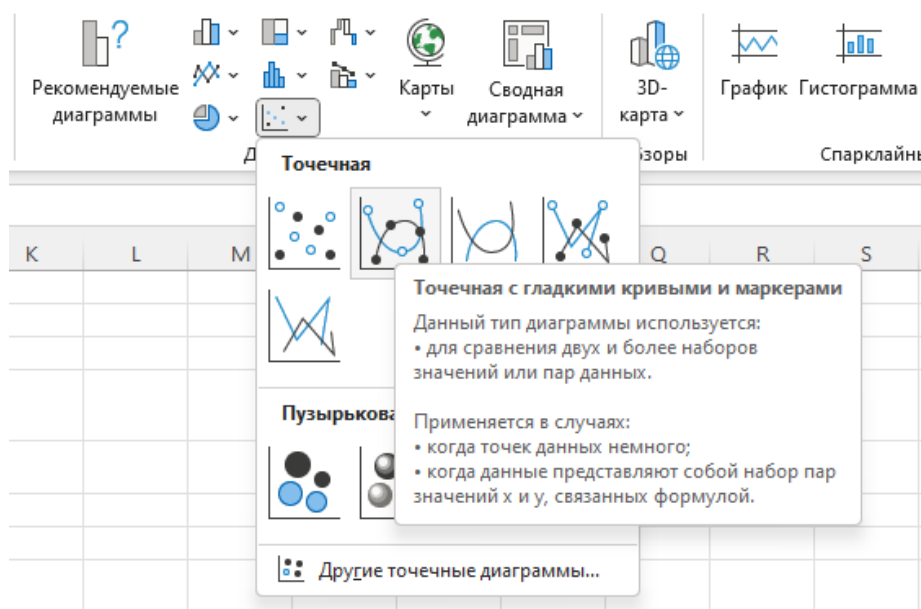


Рис. 16. Выбор типа диаграммы

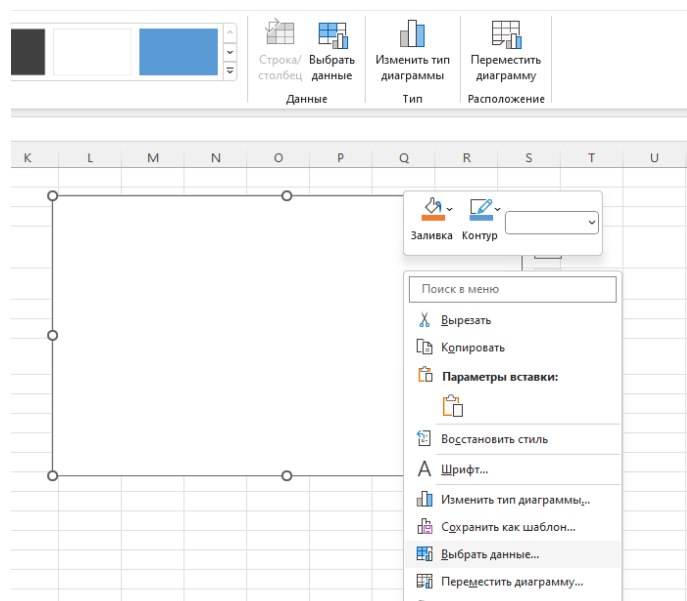




Рис. 17. Выбор данных для диаграммы

Появится пустое поле диаграммы. Далее в верхнем меню выбираем «Выбрать данные» или, нажав правой кнопкой мыши на диаграмму, из списка также выбираем «Выбрать данные» (рис. 17).

В окне «Выбор источника данных» нажимаем кнопку . Появится узкое окно «Выбор источника данных». Далее левой кнопкой мыши выделяем столбцы  $v$ ,  $\ell_{гт}$ ,  $\ell_{к}$ ,  $\ell_{т}$  и нажимаем  (рис. 18).

Лабораторная работа "Анализ тепловой экономичности ГТУ"										
Вариант № 0										
Исходные данные					Расчетные величины					
$p_1$ , МПа	$T_1$ , К	$T_2$ , К	$T_3$ , К	$T_4$ , К	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$\ell_t$ , кДж/кг	$T_2$ , К	$T_4$ , К	$\eta_t$
0,1										
<b>Таблица 1. Анализ влияния степени повышения давления <math>v</math> (обратимый цикл простой ГТУ)</b>										
$v$	$\ell_{гт}$ , кДж/кг	$\ell_{к}$ , кДж/кг	$\ell_{т}$ , кДж/кг	$q_1$ , кДж/кг	$q_2$ , кДж/кг	$\ell_t$ , кДж/кг	$T_2$ , К	$T_4$ , К	$\eta_t$	
1	0,0	0,0	0,0	904,3	904,3	0,0	273,2	1173,2	0,0000	
2	211,8	60,1	151,7	844,2	692,5	151,7	333,0	962,4	0,1797	
3	317,6	101,2	216,4	803,1	586,8	216,4	373,9	857,1	0,2694	
4	385,5	133,4	252,1	770,9	518,8	252,1	405,9	789,5	0,3270	
5	434,5	160,2	274,3	744,1	469,8	274,3	432,6	740,7	0,3686	
6	472,3	183,5	288,8	720,8	432,0	288,8	455,8	703,1	0,4007	
7	502,7	204,1	298,6	700,2	401,6	298,6	476,3	672,8	0,4265	
8	528,0	222,7	305,3	681,6	376,3	305,3	494,8	647,6	0,4480	
9	549,6	239,7	309,8	664,6	354,7	309,8	511,7	626,2	0,4662	
10	568,2	255,4	312,8	648,9	336,1	312,8	527,4	607,6	0,4821	
11	584,6	270,1	314,6	634,3	319,7	314,6	541,9	591,3	0,4960	
12	599,2	283,8	315,4	620,5	305,1	315,4	555,6	576,8	0,5083	
13	612,3	296,7	315,6	607,6	292,0	315,6	568,4	563,7	0,5195	
14	624,2	308,9	315,3	595,4	280,1	315,3	580,6	551,9	0,5295	
15	635,0	320,5	314,5	583,8	269,3	314,5	592,1	541,2	0,5387	
16	645,0	331,6	313,4	572,7	259,4	313,4	603,2	531,3	0,5471	
17	654,1	342,2	311,9	562,1	250,2	311,9	613,7	522,2	0,5549	
18	662,6	352,3	310,3	552,0	241,7	310,3	623,8	513,7	0,5621	
19	670,5	362,1	308,4	542,2	233,8	308,4	633,5	505,8	0,5688	
20	677,9	371,5	306,4	532,8	226,4	306,4	642,9	498,5	0,5751	
21	684,9	380,6	304,3	523,8	219,5	304,3	651,9	491,6	0,5810	
22	691,4	389,3	302,1	515,0	212,9	302,1	660,6	485,1	0,5865	
23	697,5	397,8	299,7	506,5	206,8	299,7	669,1	478,9	0,5917	
24	703,4	406,0	297,3	498,3	201,0	297,3	677,2	473,2	0,5967	
25	708,9	414,0	294,8	490,3	195,5	294,8	685,2	467,7	0,6014	
26	714,1	421,8	292,3	482,5	190,2	292,3	692,9	462,5	0,6058	
27	719,1	429,3	289,8	475,0	185,2	289,8	700,4	457,5	0,6100	
28	723,8	436,7	287,2	467,6	180,5	287,2	707,7	452,8	0,6141	
29	728,4	443,8	284,5	460,5	175,9	284,5	714,9	448,3	0,6179	
30	732,7	450,8	281,9	453,5	171,6	281,9	721,8	443,9	0,6216	
<b>Максимальное значение <math>\ell_t</math></b>			<b>315,6</b>							

Рис. 18. Выбор исходных данных для построения графика  $\ell = f(v)$

Исходные данные для построения графиков появятся в окне «Выбор источника данных». Если в окне «Элементы легенды(ряды)» нет  $\ell_{гт}$ ,  $\ell_{к}$ ,  $\ell_{т}$ , то следует нажать центральную кнопку «Строка/ столбец» (рис. 19).

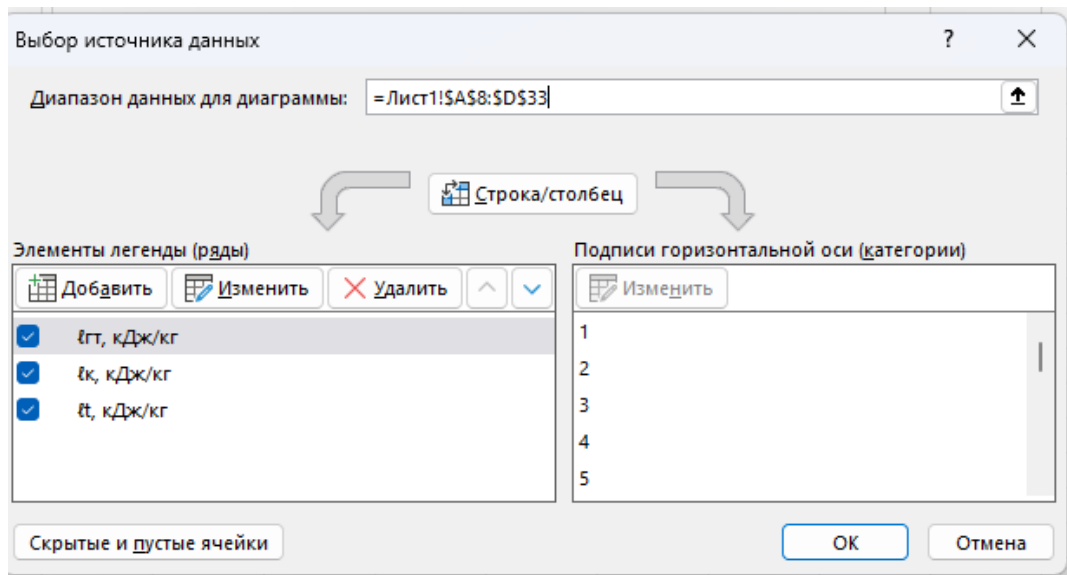





Рис. 19. Исходные данные для построения графика  $\ell = f(v)$

После нажатия кнопки ОК появится график зависимости  $\ell = f(v)$ . Непосредственно на диаграмме можно поменять или удалить название диаграммы. Для изменения диапазона значений по осям X или Y необходимо правой кнопкой щелкнуть в любом месте соответствующей оси и из списка выбрать «Формат оси». Справа появится меню, в котором можно задать максимальное и минимальное значения по оси, а также изменить параметры текста.

Названия линий (легенда) и осей можно добавить, нажав левой кнопкой мыши на поле диаграммы и активировав кнопку  в правом верхнем углу. Кнопкой  можно поменять стиль и цвет диаграммы, а кнопкой  настроить отображение данных (рис. 20).

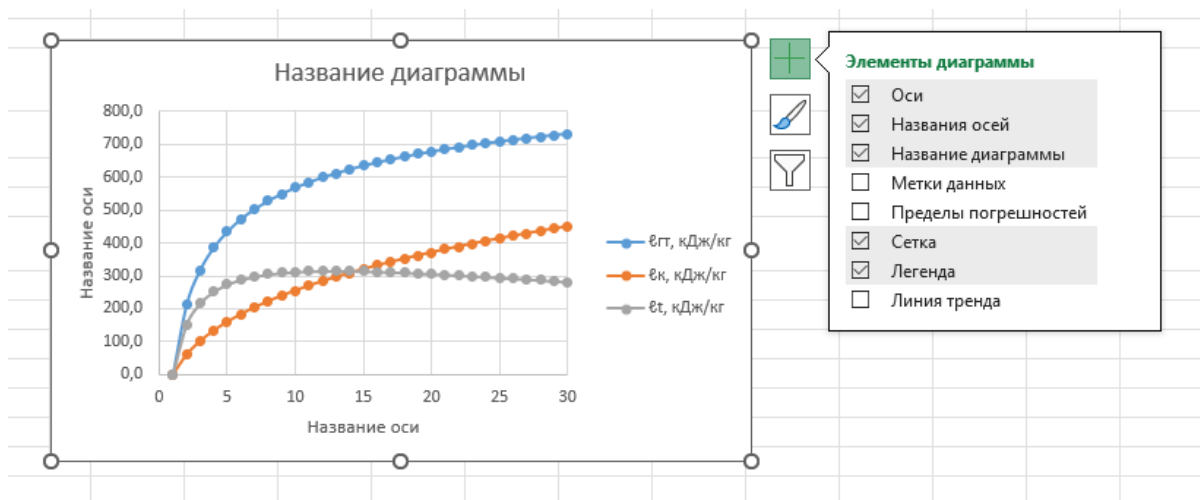


Рис. 20. Добавление элементов диаграммы

Изменить название оси можно непосредственно на диаграмме, просто вписав новый текст в соответствующее окно. Для редактиро-

вания параметров названия оси необходимо нажать правой кнопкой мыши на название оси и выбрать из списка «Формат названия оси». Справа появится меню, в котором можно изменить расположение текста, заливку, выбрать границы, добавить спецэффекты и многое другое.

Окончательный вид графика зависимости работы цикла ГТУ  $\ell = f(v)$  от степени повышения давления воздуха в компрессоре показан на рис. 21.

Аналогично строится график зависимости термического КПД от степени повышения давления воздуха в компрессоре  $\eta_t = f(v)$ . При этом при указании диапазона данных для диаграммы надо выбрать только столбец  $\eta_t$  (рис. 22).

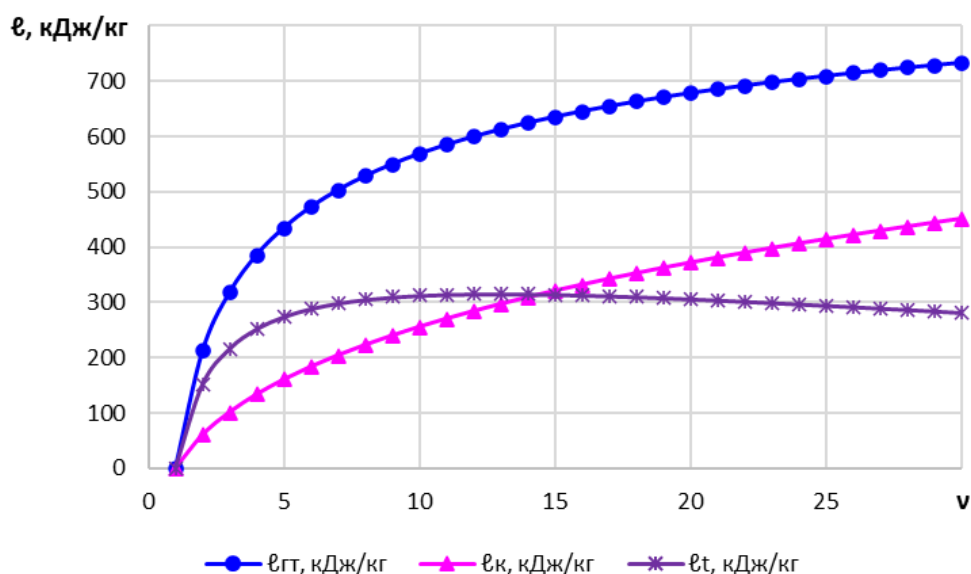


Рис. 21. Зависимость работы турбины, компрессора и цикла ГТУ от степени повышения давления воздуха в компрессоре

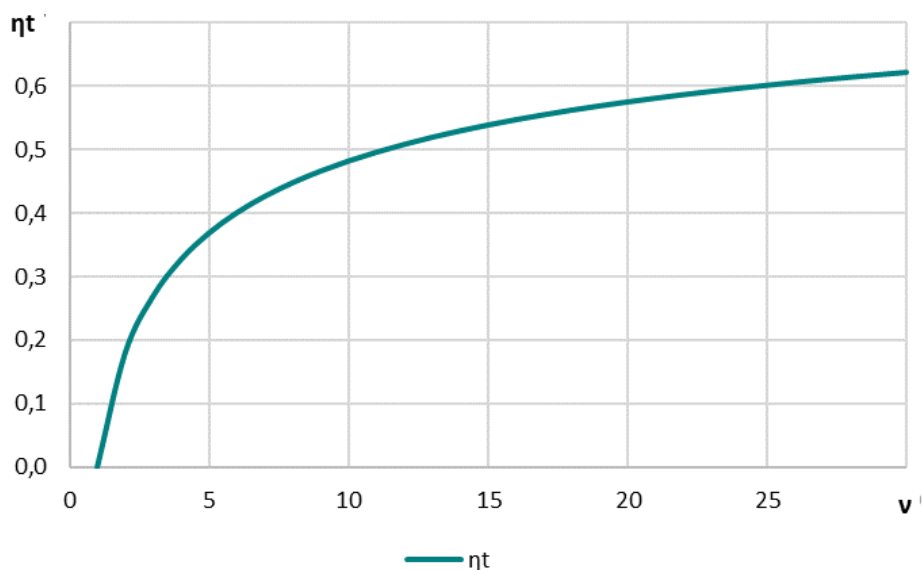


Рис. 22. Зависимость термического КПД цикла ГТУ от степени повышения давления воздуха в компрессоре

На основании полученных расчетных и графических данных выполнить анализ влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$  на тепловую экономичность простого обратимого цикла ГТУ и сделать выводы.

Следующий расчет выполняется при тех же данных, изменяется только температура газов перед турбиной  $t_{3(2)} = t_3 + \Delta t_3$ . Рекомендуется создать копию Листа1. Для этого правой кнопкой мыши нажимаем на вкладку «Лист1» и выбираем «Переместить или скопировать» (рис. 23). В появившемся окне выбираем «Переместить в конец» и ставим галочку «Создать копию». После нажатия ОК появится вкладка «Лист1(2)». Название листа можно изменить, нажав на него левой кнопкой мыши.

30	22	691,4	389,3	302,1	515,0	212,9	302,1
31	23	697,5				206,8	299,7
32	24	703,4				201,0	297,3
33	25	708,9				195,5	294,8
34	26	714,1				190,2	292,3
35	27	719,1				185,2	289,8
36	28	723,8				180,5	287,2
37	29	728,4				175,9	284,5
38	30	732,7				171,6	281,9
39	Максимальное зн						
40							
41							
42							
43							
44							

Рис. 23. Создании копии «Лист1»

На этом листе необходимо изменить значение температуры  $t_{3(2)} = t_3 + \Delta t_3$  и перевести его в Кельвины. Все остальные параметры поменяются автоматически. Полученную таблицу назвать «Таблица 2. Анализ влияния температуры газов перед турбиной  $T_3$  (обратимый цикл простой ГТУ)».

Далее сопоставляются  $V_{\text{опт}}$  и соответствующие им работа цикла и КПД ГТУ для двух значений  $t_3$  и делается вывод о влиянии температуры  $t_3$  на тепловую экономичность и на оптимальное значение степени повышения давления  $V_{\text{опт}}$  в идеальном (обратимом) цикле ГТУ.

Затем при неизменных исходных данных исследуется влияние температуры воздуха на входе в компрессор  $t_1$  на тепловую экономичность цикла ГТУ. Расчет выполняется при втором значении температуры  $t_{1(2)} = t_1 + \Delta t_1$ . Для этого также рекомендуется создать копию «Лист1» и изменить значение температуры  $t_{1(2)} = t_1 + \Delta t_1$ . Назва-



ние полученной таблицы «Таблица 3. Анализ влияния температуры воздуха перед компрессором  $T_1$  (обратимый цикл простой ГТУ)».

Аналогично сопоставляются  $v_{\text{опт}}$  и соответствующие им работа цикла и КПД ГТУ для двух значений  $t_1$ , делается вывод о влиянии  $t_1$  на тепловую экономичность и на оптимальное значение степени повышения давления  $v_{\text{опт}}$  в идеальном (обратимом) цикле ГТУ.

### 3.1.2. Расчет простого реального (необратимого) цикла ГТУ

На рис. 24 показана табл. 4 в Excel для анализа влияния степени повышения давления  $v$  на тепловую экономичность простого необратимого цикла ГТУ.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Лабораторная работа "Анализ тепловой экономичности ГТУ"												
2	Вариант № 0												
3	Исходные данные						Расчетные величины						
4	$p_1$ , МПа	$T_1$ , К	$T_3$ , К	$\eta_k$	$\eta_{\text{пт}}$	$k$	$c_{\text{пр}}$ кДж/(кгК)	$\beta$	$v_{\text{опт2}}$				
5	0,1	273,15	1173,15	0,8	0,9	1,4	1,005	4,29	7,2				
6													
7	Таблица 4. Анализ влияния степени повышения давления $v$ (необратимый цикл простой ГТУ)												
8	$v$	$\xi_{\text{т1}}$ , кДж/кг	$\xi_{\text{к1}}$ , кДж/кг	$\xi_{\text{и}}$ , кДж/кг	$q_{11}$ , кДж/кг	$q_{21}$ , кДж/кг	$\xi_{\text{и}}$ , кДж/кг	$T_2$ , К	$T_4$ , К	$T_{2i}$ , К	$T_{4i}$ , К	$\eta_i$	$\eta_t$
9	1	0,0	0,0	0,0	904,3	904,3	0,0	273,2	1173,2	273,2	1173,2	0,0000	0,0000
10	2	190,6	75,1	115,5	829,2	713,7	115,5	333,0	962,4	347,9	983,5	0,1393	0,1797
11	3	285,8	126,5	159,3	777,8	618,5	159,3	373,9	857,1	399,1	888,7	0,2048	0,2694
12	4	347,0	166,7	180,2	737,6	557,4	180,2	405,9	789,5	439,1	827,8	0,2444	0,3270
13	5	391,1	200,3	190,8	704,0	513,3	190,8	432,6	740,7	472,5	784,0	0,2710	0,3686
14	6	425,1	229,4	195,7	675,0	479,3	195,7	455,8	703,1	501,4	750,1	0,2900	0,4007
15	7	452,5	255,1	197,3	649,2	451,9	197,3	476,3	672,8	527,1	722,9	0,3040	0,4265
16	8	475,2	278,4	196,8	625,9	429,1	196,8	494,8	647,6	550,2	700,2	0,3145	0,4480
17	9	494,6	299,7	195,0	604,7	409,7	195,0	511,7	626,2	571,4	680,9	0,3224	0,4662
18	10	511,4	319,3	192,1	585,0	392,9	192,1	527,4	607,6	590,9	664,2	0,3284	0,4821
19	11	526,2	337,6	188,6	566,7	378,1	188,6	541,9	591,3	609,1	649,5	0,3328	0,4960
20	12	539,3	354,7	184,6	549,6	365,0	184,6	555,6	576,8	626,2	636,4	0,3358	0,5083
21	13	551,1	370,9	180,2	533,5	353,2	180,2	568,4	563,7	642,2	624,7	0,3379	0,5195
22	14	561,8	386,1	175,6	518,2	342,5	175,6	580,6	551,9	657,4	614,1	0,3389	0,5295
23	15	571,5	400,7	170,9	503,7	332,8	170,9	592,1	541,2	671,9	604,4	0,3392	0,5387
24	16	580,5	414,5	166,0	489,8	323,9	166,0	603,2	531,3	685,7	595,5	0,3388	0,5471
25	17	588,7	427,7	161,0	476,6	315,6	161,0	613,7	522,2	698,8	587,3	0,3378	0,5549
26	18	596,4	440,4	155,9	463,9	308,0	155,9	623,8	513,7	711,5	579,6	0,3361	0,5621
27	19	603,5	452,6	150,9	451,7	300,8	150,9	633,5	505,8	723,6	572,6	0,3340	0,5688
28	20	610,1	464,4	145,8	439,9	294,2	145,8	642,9	498,5	735,3	565,9	0,3313	0,5751
29	21	616,4	475,7	140,7	428,6	287,9	140,7	651,9	491,6	746,6	559,7	0,3282	0,5810
30	22	622,2	486,7	135,6	417,7	282,1	135,6	660,6	485,1	757,5	553,9	0,3246	0,5865
31	23	627,8	497,3	130,5	407,1	276,5	130,5	669,1	478,9	768,0	548,4	0,3206	0,5917
32	24	633,0	507,5	125,5	396,8	271,3	125,5	677,2	473,2	778,3	543,2	0,3162	0,5967
33	25	638,0	517,5	120,5	386,8	266,3	120,5	685,2	467,7	788,2	538,2	0,3114	0,6014
34	26	642,7	527,2	115,5	377,1	261,6	115,5	692,9	462,5	797,9	533,5	0,3062	0,6058
35	27	647,2	536,7	110,5	367,7	257,1	110,5	700,4	457,5	807,2	529,1	0,3006	0,6100
36	28	651,5	545,8	105,6	358,5	252,9	105,6	707,7	452,8	816,4	524,8	0,2946	0,6141
37	29	655,5	554,8	100,7	349,5	248,8	100,7	714,9	448,3	825,3	520,7	0,2882	0,6179
38	30	659,4	563,5	95,9	340,8	244,9	95,9	721,8	443,9	834,0	516,9	0,2814	0,6216
39	Максимальное значение $\eta_i$			197,3				Максимальное КПД $\eta_i$				0,3392	

Рис. 24. Пример таблицы в Excel для анализа влияния степени повышения давления  $v$  на тепловую экономичность простого необратимого цикла ГТУ



При расчете простого необратимого цикла ГТУ учитываются адиабатный коэффициент компрессора  $\eta_k$  и внутренний относительный КПД газовой турбины  $\eta_{гт}$ . Их значения берем из Приложения, в соответствии с заданным вариантом. Коэффициент  $\beta$  и  $V_{iопт2}$  рассчитывать по формулам (12) и (26).

Ввод формул в табл. 4 (рис. 24) выполняем в следующей последовательности:

1) температура воздуха на входе в камеру сгорания  $T_2$  – формула (8);

2) температура газов на выходе из газовой турбины  $T_4$  – формула (9);

3) действительная температура воздуха на входе в камеру сгорания  $T_{2i}$  – формула (16);

4) действительная температура газов на выходе из газовой турбины  $T_{4i}$  – формула (17);

5) удельная техническая работа газовой турбины  $l_{гтi}$  – формула (20);

6) удельная техническая работа компрессора  $l_{ki}$  – формула (18);

7) удельная работа цикла  $l_i = l_{гтi} - l_{ki}$ ;

8) удельная теплота, подведенная к рабочему телу  $q_{1i}$  – формула (19);

9) удельная теплота, отведенная от рабочего тела  $q_{2i}$  – формула (21);

10) удельная работа цикла  $l_i = q_{1i} - q_{2i}$  – формула (22);

11) внутренний абсолютный КПД цикла ГТУ  $\eta_i$  – формула (23).

*Обратите внимание*, что результаты расчета удельной работы цикла  $l_i$  двумя способами должны полностью совпадать.

В результате в строке 9 табл. 4 (рис. 24) должны получиться следующие формулы:

$$l_{гтi} = G \cdot (\Delta T) \cdot \beta;$$

$$l_{ki} = G \cdot (T_2 - T_{2i}) / \beta;$$

$$l_i = B - C;$$

$$q_{1i} = G \cdot (\Delta T);$$

$$q_{2i} = G \cdot (T_4 - T_{4i});$$

$$l_i = E - F;$$

$$T_2 = T_{2i} \cdot A^{((\beta - 1) / \beta)};$$

$$T_4 = T_{4i} \cdot A^{(-(\beta - 1) / \beta)};$$

$$T_{2i} = P_2 + (P_1 - P_2) / \gamma;$$

$$T_{4i} = P_2 - P_1 * (P_2 - P_1);$$

$$\eta_i = G_9 / E_9.$$

После заполнения всей строки для  $v = 1$ , копируем формулы этой строки и вставляем для  $v$  от 2 до 30.

В табл. 4 (рис. 24) находим максимальные значения работы цикла ГТУ  $\ell_i^{\max}$  и внутреннего абсолютного КПД цикла  $\eta_i^{\max}$ . По максимальному значению внутреннего абсолютного КПД цикла  $\eta_i^{\max}$  выбираем первое оптимальное значение степени повышения давления  $v_{\text{ioпт1}}$ . Строка с максимальным значением работы цикла  $\ell_i^{\max}$  будет соответствовать второму значению оптимальной степени повышения давления  $v_{\text{ioпт2}}$  в реальном (необратимом) цикле ГТУ. Найденное значение  $v_{\text{ioпт2}}$  сравниваем с рассчитанным по формуле (26) (ячейка I5). Делаем вывод о работоспособности формулы (26).

Строки, соответствующие  $v_{\text{ioпт1}}$  и  $v_{\text{ioпт2}}$ , выделяем цветом. Сравниваем найденные значения  $v_{\text{ioпт}}$  с рассчитанным для обратимого цикла ГТУ  $v_{\text{opt}}$ .

По результатам расчета строим графики изменения работы цикла ГТУ  $\ell_i = f(v)$  и внутреннего абсолютного КПД  $\eta_i = f(v)$  в зависимости от степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$ . Порядок построения аналогичный простому обратимому циклу.

На графике  $\eta_i = f(v)$  построим также линию термического КПД  $\eta_t$ . Для этого значения  $\eta_t$  скопируем из таблицы 1 на вкладке «Лист1» (рис. 12). При вставке в табл. 4 (рис. 24) выбираем в меню Главная > Вставить значения. Далее строим график выбрав в диапазоне данных для диаграммы столбцы  $\eta_i$  и  $\eta_t$ . Делаем вывод о влиянии степени повышения давления воздуха в компрессоре на КПД необратимого цикла ГТУ.

Окончательный вид графиков зависимости работы цикла ГТУ  $\ell_i = f(v)$  и внутреннего абсолютного КПД  $\eta_i = f(v)$  от степени повышения давления воздуха в компрессоре показан на рис. 25 и 26.

На основании полученных расчетных и графических данных выполнить анализ влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре  $v$  на тепловую экономичность ГТУ и сделать выводы.

Следующий расчет необратимого цикла выполняется при тех же данных, изменяется только температура газов перед турбиной  $t_{3(2)} = t_3 + \Delta t_3$ . Рекомендуется создать копию «Лист 4», на котором находится табл. 4. На новом листе необходимо изменить значение температуры  $t_{3(2)} = t_3 + \Delta t_3$  и перевести его в Кельвины. Все остальные параметры поменяются автоматически. Полученную таблицу

назвать «Таблица 5. Анализ влияния температуры газов перед турбиной  $T_3$  (необратимый цикл простой ГТУ)».

Далее сопоставляются  $V_{\text{опт}}$  и соответствующие им работа цикла и КПД ГТУ для двух значений  $t_3$  и делается вывод о влиянии температуры  $t_3$  на тепловую экономичность и на оптимальные значения степени повышения давления  $V_{\text{опт}1}$  и  $V_{\text{опт}2}$  в реальном (необратимом) цикле ГТУ.

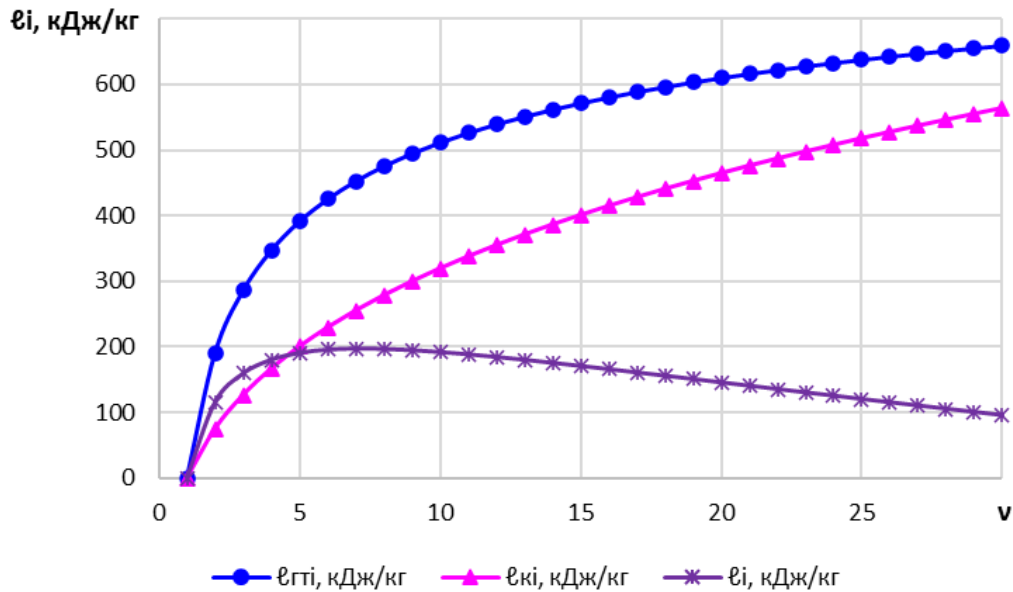


Рис. 25. Зависимость работы турбины, компрессора и цикла ГТУ от степени повышения давления воздуха в компрессоре

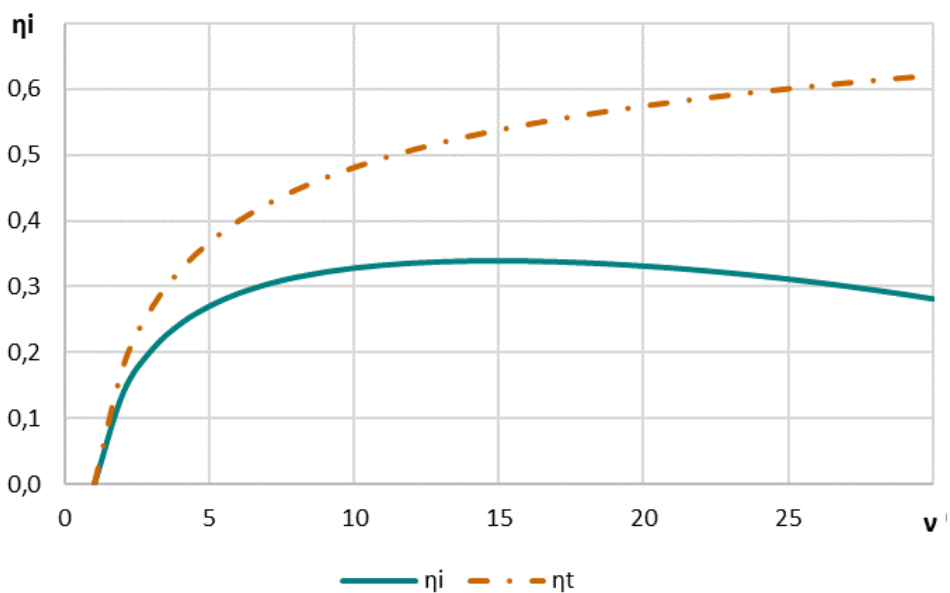


Рис. 26. Зависимость КПД цикла ГТУ от степени повышения давления воздуха в компрессоре

Затем при неизменных исходных данных исследуется влияние температуры воздуха на входе в компрессор  $t_1$  на тепловую экономичность необратимого цикла ГТУ. Расчет выполняется при втором значении температуры  $t_{1(2)} = t_1 + \Delta t_1$ . Для этого также рекомендуется создать копию «Лист 4» и изменить значение температуры  $t_{1(2)} = t_1 + \Delta t_1$ . Название полученной таблицы «Таблица 6. Анализ влияния температуры воздуха перед компрессором  $T_1$  (необратимый цикл простой ГТУ)».

Аналогично сопоставляются  $v_{i\text{опт}}$  и соответствующие им работа цикла и КПД ГТУ для двух значений  $t_1$ , делается вывод о влиянии  $t_1$  на тепловую экономичность и на оптимальные значения степени повышения давления  $v_{i\text{опт}1}$  и  $v_{i\text{опт}2}$  в реальном (необратимом) цикле ГТУ.

## 4. РУЧНОЙ РАСЧЕТ ЦИКЛОВ ГТУ

Это задание предназначено для освоения каждым студентом методики расчета тепловой экономичности простого и регенеративного циклов ГТУ.

Ручной вариант расчета простого и регенеративного циклов ГТУ выполняется в соответствии с вариантом, заданным преподавателем (Приложение). Величину степени повышения давления в компрессоре  $v$  принимают равной одному из оптимальных значений  $v_{\text{опт1}}$  или  $v_{\text{опт2}}$ , найденных в Excel для простого реального (необратимого) цикла ГТУ. При расчете регенеративного цикла величину степени регенерации  $\sigma_r$  берут из варианта задания (Приложение), а при выборе  $v$  руководствуются интервалом значений  $v_{\text{опт1}} - v_{\text{опт2}}$  для простого цикла ГТУ и соблюдением соотношения  $T_4 > T_2$  (иначе регенерация будет невозможна).

*В качестве рабочего тела принять идеальный двухатомный воздух с постоянной удельной массовой изобарной теплоемкостью  $c_p$  и молярной массой  $\mu=28,96$  кг/кмоль.*

Каждый студент выполняет следующие расчеты:

- 1) расчет простого идеального цикла ГТУ;
- 2) расчет простого реального цикла ГТУ;
- 3) расчет регенеративного идеального цикла ГТУ;
- 4) расчет регенеративного реального цикла ГТУ.

Для каждого типа ГТУ изображается схема установки и ее цикл в  $T,s$ - диаграмме.

В результате расчета каждого цикла ГТУ определяются:

- подведенная к рабочему телу удельная теплота  $q_1$  или  $q_{1i}$  ;
- отведенная от рабочего тела удельная теплота  $q_2$  или  $q_{2i}$ ;
- удельная техническая работа компрессора  $l_k$  или  $l_{ki}$ ;
- удельная техническая работа газовой турбины  $l_{гт}$  или  $l_{гти}$ ;
- удельная работа цикла  $l_t$  или  $l_i$ ;
- КПД цикла  $\eta_t$  или  $\eta_i$ .

Расчетные формулы приведены в разделе 2 данных методических указаний.

Проверка полученных результатов простого цикла ГТУ выполняется с помощью их сравнения с соответствующими результатами в среде Excel.

## 5. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе выполняется в формате А4 и должен включать:

- 1) цель работы в соответствии с заданием;
- 2) исходные данные для расчетов циклов ГТУ;
- 3) расчетные численные (табличные) и графические материалы по каждому заданию с отметкой оптимальных значений анализируемых величин;
- 4) по каждому заданию анализ тепловой экономичности цикла ГТУ и вывод;
- 5) общие выводы по всем заданиям анализа тепловой экономичности цикла ГТУ;
- 6) ручной вариант расчета простого и регенеративного циклов ГТУ при обратимых и необратимых процессах рабочего тела;

список использованной литературы;

содержание.

## 6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

1. Какие допущения приняты при рассмотрении тепловой экономичности разомкнутого цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты к рабочему телу ?
2. Как влияет на тепловую экономичность идеального цикла ГТУ степень повышения давления воздуха в компрессоре ?
3. С какой целью для ГТУ вводится коэффициент работы  $\varphi$  ?
4. Как влияет на тепловую экономичность реального цикла ГТУ степень повышения давления воздуха в компрессоре ?
5. Как влияет на тепловую экономичность идеального цикла ГТУ температура газов на выходе из камеры сгорания  $T_3$  ?
6. Как влияет на тепловую экономичность реального цикла ГТУ температура газов на выходе из камеры сгорания  $T_3$  ?
7. Как влияет на тепловую экономичность идеального цикла ГТУ температура воздуха на входе в компрессор  $T_1$  ?
8. Как влияет на тепловую экономичность реального цикла ГТУ температура воздуха на входе в компрессор  $T_1$  ?
9. Какие особенности имеет регенеративный цикл разомкнутой схемы ГТУ по сравнению с регенеративным циклом ПТУ ?
10. В чем заключается отличие влияния на тепловую экономичность идеального регенеративного цикла ГТУ степени повышения давления воздуха в компрессоре по сравнению с влиянием той же величины на экономичность простого цикла ГТУ ?
11. В чем заключается отличие влияния на тепловую экономичность реального регенеративного цикла ГТУ степени повышения давления воздуха в компрессоре по сравнению с влиянием той же величины на экономичность простого цикла ГТУ ?
12. В чем заключается отличие влияния на тепловую экономичность идеального регенеративного цикла ГТУ температуры газов на выходе из камеры сгорания  $T_3$  по сравнению с влиянием той же величины на экономичность простого цикла ГТУ ?
13. В чем заключается отличие влияния на тепловую экономичность реального регенеративного цикла ГТУ температуры газов на выходе из камеры сгорания  $T_3$  по сравнению с влиянием той же величины на экономичность простого цикла ГТУ ?
14. В чем заключается отличие влияния на тепловую экономичность идеального регенеративного цикла ГТУ температуры воздуха на входе в компрессор  $T_1$  по сравнению с влиянием той же величины на экономичность простого цикла ГТУ ?
15. В чем заключается отличие влияния на тепловую экономичность реального регенеративного цикла ГТУ температуры воздуха на входе в компрессор  $T_1$  по сравнению с влиянием той же величины на экономичность простого цикла ГТУ ?

## 7. ИНСТРУКЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММЫ «АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛОВ ГТУ» ДЛЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Программа «Анализ экономичности циклов ГТУ» используется для отчета студентов по лабораторной работы на ЭВМ. Ввод программы осуществляется запускающим файлом `gtu.exe`, при этом на экране дисплея появляется окно для ввода пароля (рис. 27).

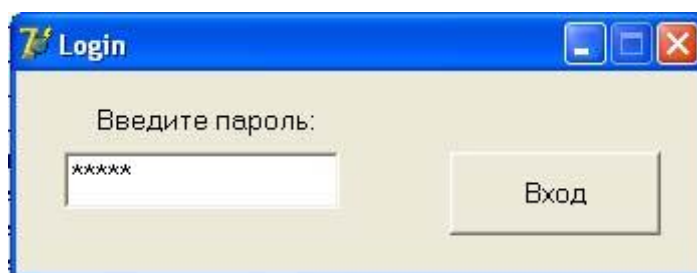


Рис. 27. Окно ввода пароля

После ввода пароля появляется основное меню программы. Оно состоит из двух пунктов: «Теория» и «Анализ работы циклов ГТУ». Каждый из них в свою очередь состоит из двух подпунктов: простого и регенеративного циклов ГТУ (рис. 28).



Рис. 28. Окно основного меню работы с программой

Для отчета по работе выбирается раздел «Теория». Выбрав в пункте «Теория», например, «Простой цикл ГТУ», попадем в окно, содержащее теоретический раздел по данному циклу (рис. 29). Для просмотра рисунков «Схема ГТУ» и «Идеальный и действительный циклы ГТУ в  $T,s$ - диаграмме» необходимо нажать кнопки «Рис. 1» и «Рис. 2» соответственно. В данном окне можно познакомиться с методикой расчета тепловой экономичности цикла ГТУ.



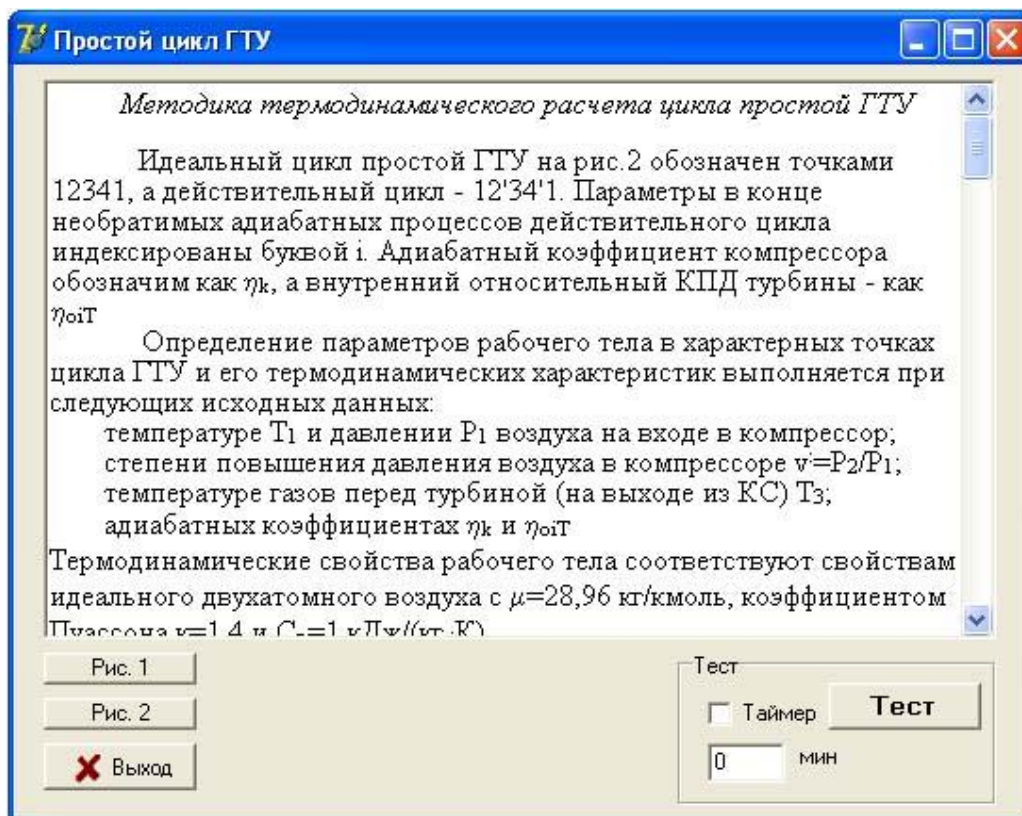


Рис. 29. Окно теоретического материала по циклам ГТУ

Этот раздел также включает в себя систему тестирования знаний студентов по расчету цикла ГТУ (простого или с регенерацией). Данная функция программы используется как элемент отчета по работе. Тест может быть запущен как с таймером, так и без него. Время таймера выставляется преподавателем. Нажав кнопку «Тест», программа запрашивает регистрацию студента (рис. 30).

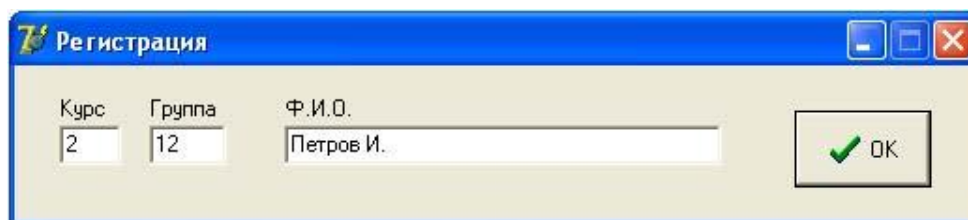


Рис. 30. Окно регистрации студента

Данные о студенте заносятся в специальный файл-отчет. После регистрации студенту предлагается выполнить тест (рис. 31). Студент вводит исходные данные для расчета КПД цикла ГТУ (варианты исходных данных приведены в Приложении, которые выдает преподаватель). После вычисления КПД ГТУ студент вводит ответ.

Если вычисления были верны, то после нажатия кнопки «Ответ» появляется окошко с сообщением «Ваша оценка: 5» (рис.32). Допускаемая в вычислениях погрешность составляет 0,5 %.

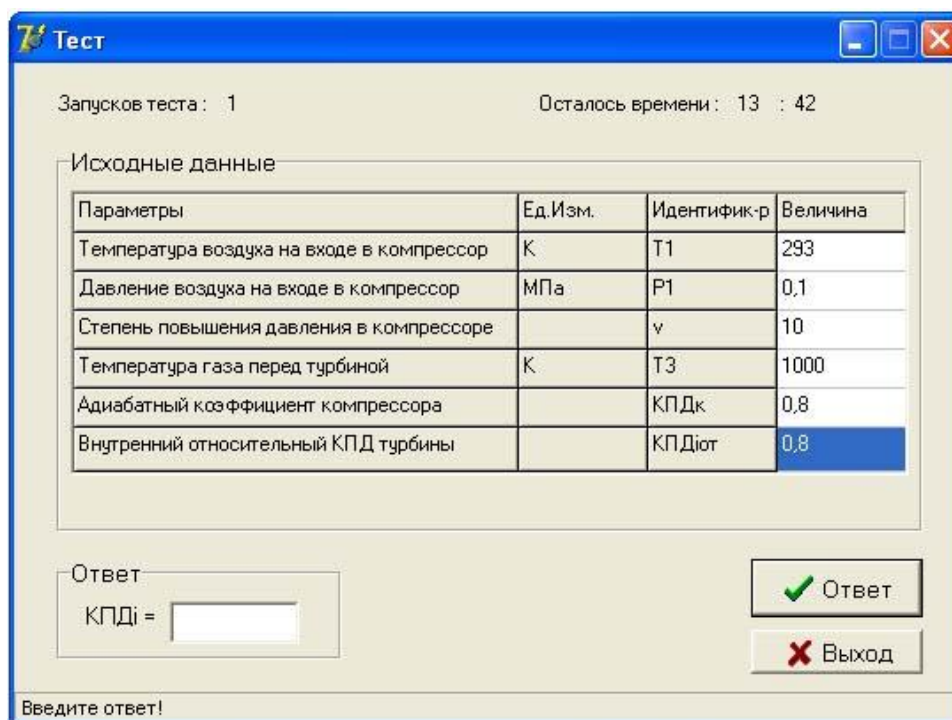


Рис. 31. Окно выполнения тестового задания

Если же в расчетах была допущена ошибка, появляется окно (рис. 33) для ввода промежуточных результатов расчета.

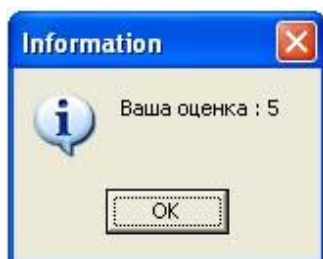


Рис. 32. Окно результата теста

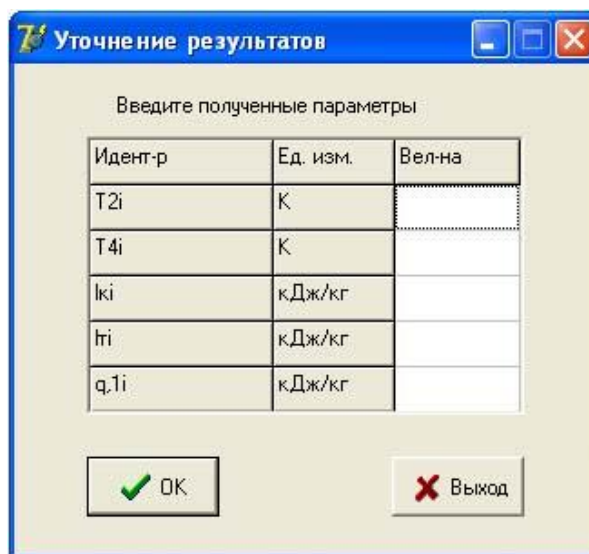


Рис. 33. Промежуточные результаты теста

За каждую верно рассчитанную величину дается один балл. После нажатия кнопки «ОК» появляется окно с оценкой студента, аналогичное рис. 32. Оценка студента заносится в файл-отчет, который может просмотреть преподаватель.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Исходные данные для выполнения расчетов циклов ГТУ

Вариант	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °C	$t_3$ , °C	$\eta_k$	$\eta_{ГТ}$	$\Delta t_3$ , °C	$\Delta t_1$ , °C	$\sigma_p$
1	0,1152	-40	1030	0,87	0,84	219	20	0,52
2	0,1161	-20	930	0,81	0,84	458	56	0,43
3	0,0918	0	1290	0,93	0,88	168	13	0,53
4	0,0915	-10	1240	0,72	0,76	227	26	0,50
5	0,0963	0	880	0,83	0,87	518	38	0,50
6	0,0945	-20	790	0,95	0,92	514	18	0,46
7	0,0966	20	1080	0,84	0,95	122	25	0,80
8	0,0999	30	1140	0,90	0,94	92	19	0,42
9	0,1020	-40	1030	0,80	0,88	112	64	0,63
10	0,1029	10	1380	0,86	0,85	77	20	0,52
11	0,0903	0	1250	0,82	0,75	109	27	0,78
12	0,1179	0	870	0,88	0,89	201	39	0,74
13	0,1119	10	1000	0,85	0,94	165	28	0,73
14	0,1035	-20	960	0,84	0,86	325	52	0,42
15	0,1155	15	1110	0,95	0,90	89	27	0,49
16	0,1101	-30	1100	0,89	0,80	109	32	0,50
17	0,1113	15	1180	0,79	0,81	165	28	0,51
18	0,1116	-10	750	0,85	0,92	225	28	0,47
19	0,1008	-20	1320	0,78	0,74	133	35	0,63
20	0,1089	0	870	0,84	0,85	263	30	0,56
21	0,1170	-40	1070	0,92	0,92	164	49	0,40
22	0,0996	0	910	0,86	0,83	303	35	0,66
23	0,1014	-40	960	0,86	0,83	296	41	0,51
24	0,1059	-30	850	0,86	0,86	336	53	0,75
25	0,1056	-30	1020	0,84	0,89	136	63	0,76
26	0,0933	-40	890	0,89	0,80	119	63	0,45
27	0,0942	18	1040	0,82	0,86	236	26	0,72
28	0,1068	-10	1020	0,88	0,87	477	44	0,70
29	0,0975	10	990	0,86	0,79	267	35	0,72
30	0,0978	5	980	0,83	0,89	100	35	0,54
31	0,1191	13	1230	0,79	0,89	172	27	0,46
32	0,1128	-30	1200	0,75	0,76	94	31	0,45
33	0,1143	-30	1120	0,81	0,81	157	23	0,78
34	0,1140	-20	1220	0,80	0,86	161	46	0,67
35	0,1017	-30	1160	0,94	0,87	155	61	0,76

Вариант	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °C	$t_3$ , °C	$\eta_k$	$\eta_{\Gamma}$	$\Delta t_3$ , °C	$\Delta t_1$ , °C	$\sigma_p$
36	0,0984	0	1010	0,88	0,84	393	19	0,69
37	0,1083	-20	870	0,88	0,85	480	39	0,57
38	0,1092	-40	950	0,85	0,82	197	35	0,43
39	0,1098	4	1110	0,81	0,79	254	26	0,72
40	0,0921	-10	1300	0,79	0,82	170	19	0,56
41	0,0993	0	1250	0,96	0,78	150	28	0,79
42	0,0951	10	1130	0,82	0,84	170	27	0,76
43	0,0936	-10	1350	0,94	0,83	126	32	0,70
44	0,0972	10	1130	0,92	0,78	236	27	0,41
45	0,1158	-10	1120	0,83	0,77	180	27	0,41
46	0,0957	14	1070	0,85	0,82	271	26	0,53
47	0,1137	-40	890	0,86	0,88	405	39	0,59
48	0,0900	10	1110	0,82	0,84	440	34	0,44
49	0,1026	-10	1200	0,83	0,87	255	39	0,65
50	0,1074	-20	1100	0,83	0,95	78	59	0,58
51	0,1164	10	950	0,78	0,90	168	32	0,71
52	0,1005	20	1360	0,91	0,83	89	19	0,60
53	0,1149	-4	1000	0,80	0,91	314	44	0,62
54	0,1038	-10	1050	0,80	0,78	185	43	0,77
55	0,1110	3	980	0,87	0,83	258	27	0,62
56	0,1176	8	920	0,87	0,88	465	28	0,56
57	0,1041	-10	990	0,87	0,81	229	21	0,65
58	0,0948	-10	1190	0,73	0,81	270	40	0,44
59	0,1125	-20	980	0,90	0,85	294	41	0,49
60	0,1194	-30	800	0,87	0,88	212	52	0,74
61	0,1122	-10	960	0,81	0,82	439	40	0,61
62	0,0930	-30	1270	0,73	0,73	106	26	0,42
63	0,1077	10	960	0,86	0,80	343	30	0,47
64	0,1053	-30	930	0,89	0,81	165	28	0,68
65	0,0990	20	1280	0,83	0,91	83	25	0,66
66	0,0912	-30	1140	0,81	0,84	224	40	0,61
67	0,1167	0	1160	0,85	0,87	154	28	0,54
68	0,0960	-10	1210	0,75	0,80	106	22	0,48
69	0,1062	10	1120	0,82	0,87	372	19	0,48
70	0,1146	10	1320	0,72	0,85	180	25	0,68
71	0,1131	-40	1010	0,80	0,80	245	41	0,65
72	0,0939	0	1040	0,80	0,79	274	32	0,64
73	0,0927	0	1050	0,87	0,93	371	16	0,70

Вариант	$p_1$ , МПа	$t_1$ , °C	$t_3$ , °C	$\eta_k$	$\eta_{\Gamma T}$	$\Delta t_3$ , °C	$\Delta t_1$ , °C	$\sigma_p$
74	0,1044	-40	940	0,82	0,80	99	38	0,58
75	0,1023	-20	1170	0,77	0,84	118	49	0,55
76	0,1050	-10	840	0,89	0,90	631	25	0,46
77	0,1047	-40	1140	0,86	0,90	116	40	0,58
78	0,1086	6	1020	0,84	0,82	189	36	0,73
79	0,1032	-40	1240	0,81	0,85	74	70	0,71
80	0,1080	-10	1110	0,89	0,86	75	31	0,64
81	0,1011	0	990	0,81	0,87	124	33	0,62
82	0,1185	-20	950	0,91	0,84	451	41	0,68
83	0,1173	-30	1060	0,80	0,81	248	43	0,67
84	0,0987	-20	1210	0,77	0,81	150	30	0,78
85	0,1182	3	1070	0,89	0,73	123	33	0,45
86	0,1134	-30	1150	0,86	0,82	80	47	0,53
87	0,0969	10	930	0,87	0,87	480	25	0,76
88	0,1071	-20	1160	0,79	0,93	64	40	0,61
89	0,0924	-40	1000	0,82	0,85	155	43	0,40
90	0,1104	0	1030	0,85	0,88	159	25	0,58
91	0,1065	20	1330	0,95	0,91	372	14	0,77
92	0,0954	10	1280	0,81	0,82	180	26	0,55
93	0,0906	-30	1200	0,84	0,80	148	70	0,67
94	0,0909	0	900	0,87	0,88	340	36	0,59
95	0,1188	-20	1190	0,86	0,81	224	31	0,54
96	0,0981	10	1310	0,83	0,87	102	22	0,69
97	0,1107	-20	1040	0,84	0,89	149	27	0,74
98	0,1002	8	1300	0,88	0,83	75	30	0,48
99	0,1095	-20	1000	0,81	0,85	154	50	0,60
100	0,1197	-40	1170	0,93	0,93	103	27	0,40

Варианты заданий базируются на следующем диапазоне изменения исходных данных, соответствующем программе «Анализ экономичности циклов ГТУ»:

$t_1$  – температура воздуха перед компрессором (диапазон изменения  $-40 \div +40$  °C);

$p_1$  – давление воздуха перед компрессором (диапазон изменения  $0,09 \div 0,12$  МПа);

$t_3$  – температура газов перед газовой турбиной (диапазон изменения  $500 \div 1500$  °C);

$\sigma_p$  – степень регенерации (диапазон изменения  $0 \div 0,9$ );

$\eta_{\text{от}}$  – внутренний относительный КПД турбины (диапазон изменения  $0,5 \div 1$ );

$\eta_k$  – адиабатный коэффициент компрессора (диапазон изменения  $0,5 \div 1$ ).

## Библиографический список

1. **Чухин, И. М.** Техническая термодинамика. Часть 2.: учеб. пособие / И.М. Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 228 с.
2. **Чухин, И. М.** Анализ тепловой экономичности циклов ГТУ: Методические указания для выполнения лабораторной работы на ЭВМ по курсу "Теоретические основы теплотехники"/ И.М. Чухин; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 36 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	4
2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	5
2.1. Анализ тепловой экономичности простого цикла ГТУ .....	6
2.1.1. Влияние параметров рабочего тела на тепловую экономичность идеального (обратимого) цикла ГТУ .....	8
2.1.2. Влияние параметров рабочего тела на тепловую экономичность реального (необратимого) цикла ГТУ .....	12
2.2. Регенеративный цикл ГТУ .....	16
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ В СРЕДЕ EXCEL.....	20
3.1. Пример выполнения лабораторной работы в среде Excel .....	23
3.1.1. Расчет простого идеального (обратимого) цикла ГТУ.....	23
3.1.2. Расчет простого реального (необратимого) цикла ГТУ .....	32
4. РУЧНОЙ РАСЧЕТА ЦИКЛОВ ГТУ .....	37
5. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ .....	38
6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ .....	39
7. ИНСТРУКЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММЫ «АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛОВ ГТУ» ДЛЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	40
Приложение .....	43
Библиографический список .....	46

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛОВ ГТУ  
*Методические указания для выполнения лабораторной работы на  
ЭВМ по курсу «Техническая термодинамика»*

Составители ЧУХИН Иван Михайлович  
РАКУТИНА Дарья Валериевна

Редактор Т.Н. Пожилова

Подписано в печать .2023 г. Формат 60×84 I/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 2,79. Тираж 100 экз. Заказ № .

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ  
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.