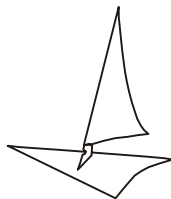


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний морський технічний університет
імені адмірала Макарова

Н. В. ВАЩИЛЕНКО

**Оптимізаційні розрахунки термодинамічних
циклів суднових і енергетичних ГТА в задачах
автоматизованого проектування**

*Рекомендовано Методичною радою УДМТУ
як навчальний посібник*



Миколаїв
УДМТУ
2003

УДК 621.431.74:681.3:51

ББК 39.455.3

Ва 12

Рекомендовано Методичною радою УДМТУ як навчальний посібник

Рецензент д-р техн. наук, професор С.І. Сербін

Ващиленко М.В.

Ва 12 Оптимізаційні розрахунки термодинамічних циклів суднових і енергетичних ГТА в задачах автоматизованого проектування: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 44 с.

У навчальному посібнику розглянуті питання математичного моделювання процесів складних термодинамічних циклів суднових і енергетичних ГТА. Описано алгоритми і реалізуючі програми для персональних ЕОМ, що дозволяють оптимізувати параметри різних циклів ГТА. Наведено інструкції для роботи з програмами "GTA1CC" і "GTA1CK" на ПК IBM PC AT в операційній системі MS-DOS.

Посібник призначений для студентів спеціальності "Турбіни" при виконанні курсових і дипломних проектів.

УДК 621.431.74:681.3:51

ББК 39.455.3

© Ващиленко М.В., 2003

© Український державний морський
технічний університет, 2003

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

- c_p – середня масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);
 d – відносний масовий вміст пари, газу в суміші;
 G – масова витрата, кг/с;
 h – ентальпія робочого тіла, Дж/(кг·К);
 K – параметр розподілу роботи;
 k – показник адіабати процесу;
 N – потужність, Вт;
 P – тиск, Па;
 r – ступінь регенерації;
 s – ентропія, Дж/(кг·К);
 T – температура, К;
 β – коефіцієнт витрати;
 η – коефіцієнт корисної дії;
 μ – коефіцієнт повернення роботи;
 ν – коефіцієнт відновлення повного тиску;
 π – ступінь підвищення, зниження тиску;
 τ – відносна температура.

Індекси

- 1 – параметри повітря перед компресором;
- 2 – параметри повітря на виході з компресора, регенератора;
- 4 – параметри газу на виході з турбіни;
- 5 – параметри газу на виході з регенератора;

б – параметри газу на виході з УПГ;
в – повітря, вода;
г – гази;
гп – газопарова суміш;
д – допалювання;
е – економайзер, еталонний, ефективний;
к – компресор;
кор – корисний;
м – механічний;
о – охолодження проміжне;
ох – охолоджуюче повітря, пара;
п – пара, політропічний, початковий;
пит – питомий;
р – регенератор;
т – турбіна.

Скорочення

ГТА – газотурбінний агрегат;
ГТД – газотурбінний двигун;
ГЦН – головний циркуляційний насос;
ВП – випарна поверхня нагрівання УПГ;
КН – конденсатний насос;
КЗ – камера згоряння;
КЗПП – камера згоряння проміжного підігріву газу;
ППО – проміжний повітроохолоджувач;
ПГК – парогазовий конденсатор;
ПК – персональний комп'ютер;
ЖН – живильний насос;
ПП – пароперегрівальна поверхня нагрівання УПГ;
ПТ – парова турбіна;
СП – сепаратор пари;
ТУК – теплоутилізуючий контур;
УПГ – утилізаційний парогенератор;
ЦН – циркуляційний насос;
ЕП – економайзерна поверхня нагрівання УПГ.

1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ЦИЛІВ ГТА

1.1. Постановка задачі вибору оптимальних термодинамічних параметрів циклів суднових і енергетичних ГТА

Підвищення термодинамічної ефективності суднових і енергетичних ГТА, що дозволяє знизити витрату палива і підвищити їхню конкурентоспроможність, може здійснюватися наступними шляхами: підвищенням параметрів термодинамічного циклу, зниженням рівня необоротних втрат у термодинамічних процесах, ускладненням теплової схеми. З цією метою може здійснюватися як карнотизація циклу Брайтона, так і його виконання в комбінації з утилізаційним пароводяним циклом Ренкіна [1–4, 7].

Для подальшого розгляду виділимо вісім розповсюджених у практиці турбобудування схем суднових ГТА (рис. 1), які є найбільш перспективними.

Оптимізація газотурбінного циклу передбачає відшукування такого сполучення його термодинамічних параметрів, що дозволяє одержати найкращий варіант ГТА відносно взятого критерія ефективності. Найчастіше як критерій ефективності при дослідженні циклів ГТА використовують їхній ефективний ККД

$$\eta_e = \frac{q_{\text{кор}}}{q_{\text{КЗ}}} \eta_m, \quad (1)$$

де $q_{\text{кор}}$ – корисна енергія, отримана в циклі; $q_{\text{КЗ}}$ – повні енерговитрати в КЗ; η_m – коефіцієнт, що враховує механічні втрати і витрати енергії на власні потреби ГТА.

У загальному випадку залежність η_e від заданих початкових умов і контрольованих параметрів, значення яких слід визначити в процесі оптимізації, може бути записана у вигляді

$$\eta_e = F(x_1, x_2, \dots, x_n; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \quad (2)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ – контрольовані параметри; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ – фіксовані (початкові) параметри.

Функціональну залежність (2) можна розглядати як спрощену схему математичної моделі, що використовується при оптимізації. Таким чином, здійснивши оптимізацію параметрів газотурбінного

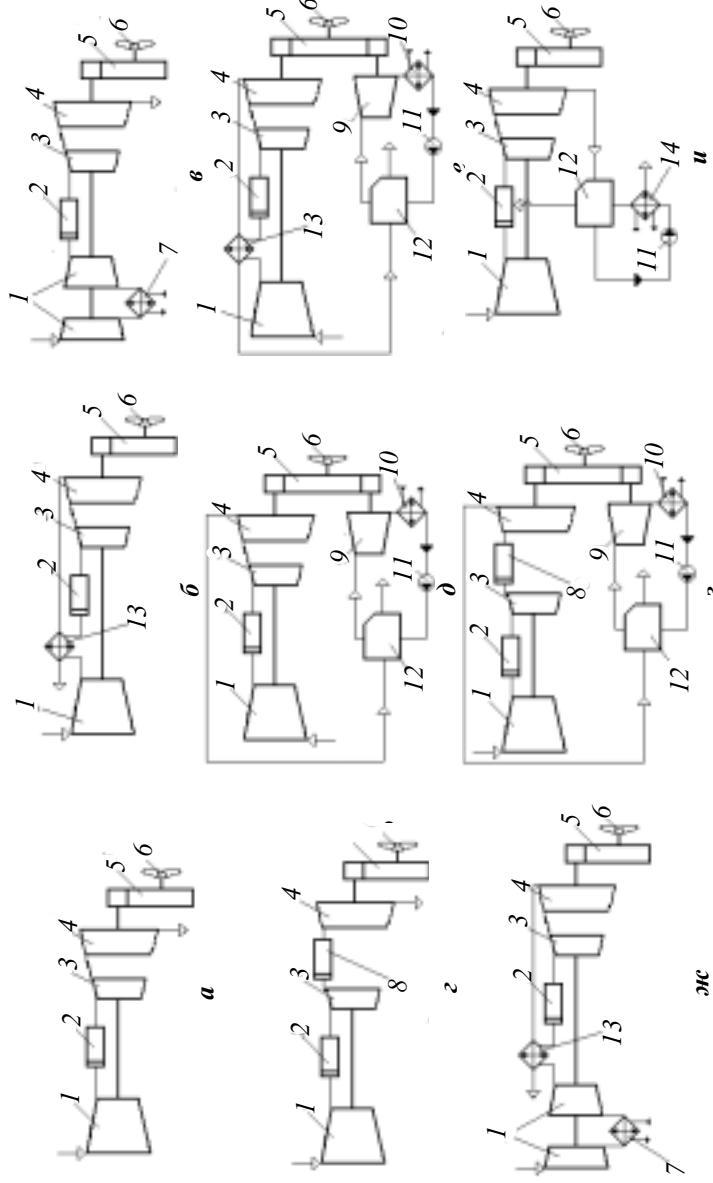


Рис. 1. Схеми розповсюджених і перспективних суднових ГТА:

а – проста схема; **б** – з регенерацією тепла відхідних газів ГТД; **в** – із проміжним охолодженням повітря; **г** – із проміжним підгрівом газу; **д** – з ТУК; **е** – з регенерацією тепла відхідних газів ГТД і ТУК; **жс** – із проміжним охолодженням повітря і регенерацією тепла відхідних газів, ГТД; **з** – із КЗПП і ТУК; **и** – контактний ГТА з ТУК; **1** – компресор; **2** – основна КЗ; **3** – турбіна компресора; **4** – турбіна гвинта; **5** – редуктор; **6** – гребний гвинт; **7** – проміжний повітроохолоджувач; **8** – КЗПП; **9** – ПТ; **10** – паровий конденсатор; **11** – ЖН; **12** – УПН; **13** – регенератор; **14** – парогазовий конденсатор

циклу, необхідно одержати числові значення контрольованих параметрів, які забезпечують максимум ефективного ККД ГТУ.

Метод, використовуваний у задачі оптимізації газотурбінного циклу, залежить від числа оптимізовуваних (контрольованих) параметрів, а також зручності ухвалення остаточного рішення при виборі проектних параметрів ГТД за результатами оптимізації. Так, для схеми, зображеної на рис. 1, *a*, оптимізовуваним є тільки один параметр $\pi_{\kappa_{\Sigma}}$ – загальний ступінь підвищення тиску в циклі, який найбільш раціонально знаходити методом сканування, що передбачає послідовне перебирання (із заданим кроком і порядком) параметрів в області пошуку. Побудувавши графік залежності $\eta_c = f(\pi_{\kappa_{\Sigma}})$, можна знайти оптимальне значення цього параметра $\pi_{\kappa_{\text{opt}}}$, що відповідає максимальному значенню функції – $\eta_{c_{\text{max}}}$. Зазначимо, що проектне значення цього параметра звичайно беруть менше $\pi_{\kappa_{\text{opt}}}$, з огляду на пологий характер функції (2) поблизу максимуму.

При більшій кількості оптимізовуваних параметрів метод сканування раціонально сполучити з градієнтним методом, що передбачає використання похідних функцій (2). У цьому випадку оптимальні параметри знаходяться в результаті розв'язання системи рівнянь вигляду

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta_c}{\partial x_1} &= 0; \\ \frac{\partial \eta_c}{\partial x_1} &= 0; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial \eta_c}{\partial x_1} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

1.2. Основні положення і принципи розробки математичних моделей газотурбінних циклів. Модель циклу ГТА простої схеми

Базовим циклом ГТА, схеми яких зображені на рис. 1, є газотурбінний цикл з підведенням теплоти при сталому тиску – так званий цикл Брайтона (рис. 2). У процесі 1–2 відбувається підвищення

тиску повітря в компресорі, що супроводжується зростанням температури; 2–3 – процес теплопідведення в КЗ; 3–4 – процес розширення газів у турбінах; 4–1_а – умовний процес замикання циклу в атмосфері.

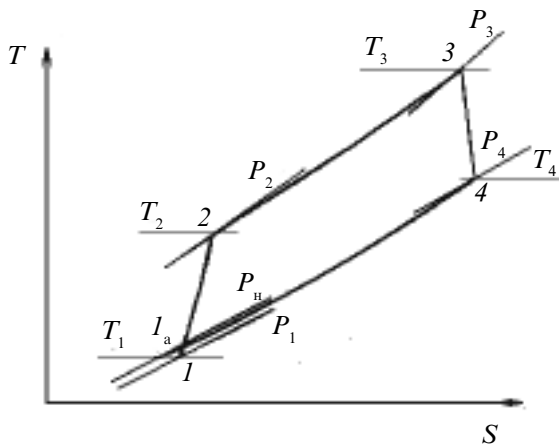


Рис. 2. Термодинамічний цикл ГТА простої схеми

Основними показниками економічності й ефективності газотурбінного циклу, як уже говорилося раніше, є його ефективний ККД η_e , а також питома потужність, яка є відношенням потужності, що знімається з вихідного фланця редуктора ГТА, до витрати повітря на вході в ГТД:

$$N_{e_{\text{шт}}} = \frac{q_{\text{кор}}}{G_{\text{в}}} \eta_{\text{м}}. \quad (4)$$

Корисна енергія, одержувана в циклі, являє собою різницю між енергією, еквівалентною роботі турбін, і витратами енергії на привід компресора:

$$q_{\text{к}} = G_{\text{г}} T_3 c_{p_{\text{г}}} \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{г}}^{\frac{k_{\text{г}}-1}{k_{\text{г}}}}} \right) \eta_{\text{т}} - G_{\text{в}} T_1 c_{p_{\text{в}}} \left(\pi_{\text{к}}^{\frac{k_{\text{в}}-1}{k_{\text{в}}}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{\text{к}}}. \quad (5)$$

Адіабатичні ККД компресорів η_k і турбін η_t , які працюють у складі ГТД, залежать як від рівня досконалості лопаткових машин, що враховується ККД елементарного ступеня η_{Π} , так і від абсолютних значень π_k і π_t . У такому випадку, згідно з [7], можна записати: для адіабатичного ККД компресора

$$\eta_k = \frac{\pi_k^{\frac{k_b-1}{k_b}} - 1}{\pi_k^{k_b \eta_{\Pi}} - 1}; \quad (6)$$

для адіабатичного ККД турбіни

$$\eta_t = \frac{1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{(k_t-1)\eta_{\Pi}}{k_t}}}}{1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{k_t-1}{k_t}}}}. \quad (7)$$

Здійснивши підстановку (6) і (7) у (5), одержимо:

$$q_k = T_1 (G_{\Gamma} \tau c_{p_{\Gamma}} \Pi_m - G_{\text{в}} c_{p_{\text{в}}} \Pi_n), \quad (8)$$

де

$$\Pi_n = \left(\pi_k^{\frac{k_b-1}{k_b \eta_{\Pi}}} - 1 \right); \quad \Pi_m = \left(1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{(k_t-1)\eta_{\Pi}}{k_t}}} \right); \quad \tau = \frac{T_3}{T_1}.$$

Ступінь розширення газу в турбінах і ступінь підвищення тиску повітря в компресорі зв'язані співвідношенням $\pi_t = v_{\Sigma} \pi_k$. Параметр v_{Σ} враховує втрати повного тиску по газоповітряному тракту ГТА та, у свою чергу, визначається за формулою

$$v_{\Sigma} = v_{\text{вх}} v_{\text{к}} v_{\text{кЗ}} v_{\text{т}} v_{\text{гв}}, \quad (9)$$

де $v_{\text{вх}}$, $v_{\text{к}}$, $v_{\text{кЗ}}$, $v_{\text{т}}$, $v_{\text{гв}}$ – коефіцієнти відновлення повного тиску відповідно у вхідному пристрої ГТД, переходнику компресора, камері згоряння, опорних вінцях турбін, газівідвідному пристрої.

Якщо знехтувати різницею між витратою повітря на вході в КЗ і витратою газу на виході, вираз для визначення повних енерговитрат у КЗ буде мати вигляд

$$q_{\text{КЗ}} = G_{\text{ГКЗ}} \left[c_{p_{\text{Г}}} (T_3 - 293) - c_{p_{\text{В}}} (T_2 - 293) \right] \frac{1}{\eta_{\text{КЗ}}}, \quad (10)$$

де $G_{\text{ГКЗ}}$ – витрата газу на виході з КЗ; $\eta_{\text{КЗ}}$ – коефіцієнт повноти згоряння.

Після підстановки (8) і (10) у (1) одержимо вираз для ефективного ККД циклу ГТА простої схеми:

$$\eta_{\text{е}} = \frac{G_{\text{Г}} \tau \frac{c_{p_{\text{Г}}}}{c_{p_{\text{В}}}} \Pi_m - G_{\text{В}} \Pi_n}{G_{\text{ГКЗ}} \left[\frac{c_{p_{\text{Г}}}}{c_{p_{\text{В}}}} \tau - (1 + \Pi_n) - \left(\frac{c_{p_{\text{Г}}}}{c_{p_{\text{В}}}} - 1 \right) \frac{293}{T_1} \right]} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{КЗ}}. \quad (11)$$

Витрата газу через турбіну зв'язана з витратою повітря через компресор співвідношенням

$$\frac{G_{\text{Г}}}{G_{\text{В}}} = \beta - g_{\text{ox}}, \quad (12)$$

де β – коефіцієнт витрати, що враховує сталу складову витоків і повернення газу по тракту ГТД; g_{ox} – відносна витрата повітря, що відбирається за компресором для охолодження лопаткового апарата турбін.

Якщо розрахункова температура газу перед турбіною перевищує допустиму з умови міцності температуру металу лопатки $T_{\text{д}}$, то лопаткові апарати турбін виконують охолоджуваними. Найбільш розробленими і застосовуваними нині є системи внутрішнього повітряного конвективного охолодження соплових і робочих лопаток, які дозволяють знижувати середню температуру стінки лопатки на 300...400 градусів [5, 6]. Відкрита система охолодження здійснює відбір необхідної кількості повітря за компресором ГТД або з його проміжного ступеня. Відносна витрата охолоджуючого повітря (12) може бути знайдена відповідно до моделі, запропонованої В.І. Ло-

каєм, за формулою

$$g_{ox} = \frac{G_{ox}}{G_B} = ak_T g_e \beta_T \frac{(n_{ox} + 1)(T_3 - T_d)}{2(T_d - T_2)} \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{0,25}, \quad (13)$$

де β_T – коефіцієнт витрати газу для охолоджуваної турбіни; g_e – еталонне значення коефіцієнта витрати охолоджуючого повітря; k_T – коефіцієнт, що враховує охолодження через торцеві поверхні лопаткових вінців, береться 1,05...1,10; a – коефіцієнт перерахування параметра g_e на натурні умови; при $(T_3 - T_d) \leq 100$ град береться $a = 1,6...1,7$, в інших випадках рекомендується $a = 1,3...1,4$.

Число охолоджуваних вінців турбіни n_{ox} у формулі (13) розраховується за співвідношенням

$$n_{ox} = \text{ціле} \frac{2 \lg \frac{T_d}{T_3}}{\lg \left[1 - \left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{ст} \right]},$$

де $\left(\frac{\Delta T}{T} \right)_{ст}$ – відносний температурний перепад на ступінь охолоджуваної турбіни, береться 0,11...0,14.

Орієнтовані значення параметра g_e для температур циклу $T_3 = 1100...1500$ К за даними [5, 6] можна брати:

для конвективних схем охолодження – 0,022...0,035;

для конвективно-плівкових – 0,022...0,024.

Відзначимо, що зі збільшенням T_3 зростає і значення параметра g_e .

Втрати енергії, пов'язані з відбором повітря на охолодження, не є до кінця необоротними, оскільки повітря після виконання функції охолодження лопаток скидається в проточну частину ГТД і частково повертає в цикл енергію, витрачену на його стискання у компресорі. У математичній моделі цей ефект ураховується коефіцієнтом повернення роботи охолоджуючого повітря μ , значення якого, у залежності від конструктивних особливостей схеми охолодження, можуть братися 0,5...0,7.

З урахуванням вищевикладеного при описі циклу ГТА з

охлаждаваними турбінами вирази (7) і (10) набувають вигляду

$$q_{\Pi} = G_{\text{в}} T_1 c_{p_{\text{в}}} \left\{ (\beta - g_{\text{ox}}) \tau \frac{c_{p_{\text{г}}}}{c_{p_{\text{в}}}} \Pi_m - [(1 - \mu) + \mu(\beta - g_{\text{ox}})] \Pi_n \right\} \eta_{\text{м}}; \quad (14)$$

$$q_{\text{КЗ}} = G_{\text{в}} T_1 c_{p_{\text{в}}} (\beta - g_{\text{ox}}) \left[\tau \frac{c_{p_{\text{г}}}}{c_{p_{\text{в}}}} - (1 + \Pi_n) - \left(\frac{c_{p_{\text{г}}}}{c_{p_{\text{в}}}} - 1 \right) \frac{293}{T_1} \right] \frac{1}{\eta_{\text{КЗ}}}. \quad (15)$$

Після підстановки (14) і (15) в (1) одержуємо вираз для визначення ефективного ККД циклу ГТА простої схеми виходячи з (11):

$$\eta_{\text{е}} = \frac{\tau \frac{c_{p_{\text{г}}}}{c_{p_{\text{в}}}} \Pi_m - L \Pi_n}{\tau \frac{c_{p_{\text{г}}}}{c_{p_{\text{в}}}} - (1 + \Pi_n) - \left(\frac{c_{p_{\text{г}}}}{c_{p_{\text{в}}}} - 1 \right) \frac{293}{T_1}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{КЗ}}. \quad (16)$$

Параметр $L = \frac{1 - \mu}{\beta - g_{\text{ox}}} + \mu$ у формули (16) враховує теплофізичні властивості робочих тіл $c_{p_{\text{в}}}, c_{p_{\text{г}}}, k_{\text{в}}, k_{\text{г}}$, які визначаються за допомогою апроксимаційних залежностей і формул, викладених раніше в [1].

Ефективна питома потужність ГТА простого циклу з урахуванням формул (4) і (14)

$$N_{\text{е, уд}} = T_1 c_{p_{\text{в}}} (\beta - g_{\text{ox}}) \left(\tau \frac{c_{p_{\text{г}}}}{c_{p_{\text{в}}}} \Pi_m - L \Pi_n \right) \eta_{\text{м}}. \quad (17)$$

1.3. Особливості математичних моделей циклів ГТА з регенерацією тепла вихідних газів ГТД

Одним з методів підвищення ККД газотурбінного циклу є використання залишкового енергоресурсу газів, що відходять з ГТД, для попереднього підігрівання повітря перед подачею в КЗ. Цей метод практично реалізується шляхом введення в схему ГТА поверхневого

теплообмінника-регенератора (див. рис. 1, *б, е, ж*). Термодинамічний цикл ГТА з регенерацією теплоти відхідних газів ГТД показаний на рис. 3. На відміну від циклу ГТА простої схеми в цьому циклі додатково здійснюються процеси підігрівання повітря (2–2_р) і охолодження газів у регенераторі (4–5). Ефективність використання залишкового енергоресурсу відхідних газів ГТД визначається за допомогою параметра, який називається ступенем регенерації,

$$r = (T_{2_p} - T_2) / (T_4 - T_2).$$

Введення в схему ГТА регенератора істотно збільшує сумарні втрати повного тиску в циклі. У цьому випадку формула (9) набуває вигляду

$$V_{\Sigma} = V_{\text{вх}} V_{\text{к}} V_{\text{рв}} V_{\text{кз}} V_{\text{т}} V_{\text{пр}} V_{\text{гв}},$$

де $v_{\text{рв}}$ і $v_{\text{пр}}$ – втрати повного тиску в матриці регенератора відповідно по повітряній і по газовій стороні, у розрахунках беруться рівними 0,96...0,98.

Формула для визначення повних енергетичних витрат у КЗ ГТД

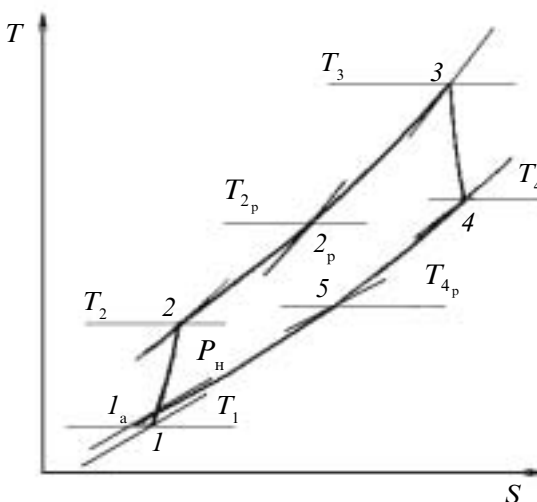


Рис. 3. Термодинамічний цикл ГТА з регенерацією теплоти відхідних газів ГТД

з урахуванням попереднього підігріву повітря в регенераторі набуде вигляду

$$q_{\text{кз}} = G_{\text{в}} T_1 c_{p_{\text{в}}} (\beta - g_{\text{ox}}) \left\{ \tau \left[\frac{c_{p_r}}{c_{p_{\text{в}}}} - r(1 - \Pi_m) \right] - (1 - r)(1 + \Pi_n) - \right. \\ \left. - \left(\frac{c_{p_r}}{c_{p_{\text{в}}}} - 1 \right) \frac{293}{T_1} \right\} \frac{1}{\eta_{\text{кз}}}.$$

Ефективний ККД циклу ГТА з регенерацією теплоти відхідних газів ГТД

$$\eta_{\text{е}} = \frac{\tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_{\text{в}}}} \Pi_m - L \Pi_n}{\tau \left[\frac{c_{p_r}}{c_{p_{\text{в}}}} - r(1 - \Pi_m) \right] - (1 - r)(1 + \Pi_n) - \left(\frac{c_{p_r}}{c_{p_{\text{в}}}} - 1 \right) \frac{293}{T_1}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{кз}}.$$

Питома потужність циклу ГТА з регенерацією теплоти відхідних газів ГТД визначається теж за формулою (17).

1.4. Особливості математичних моделей циклів ГТА з проміжним охолодженням повітря

Карнотизація газотурбінного циклу в процесі підвищення тиску здійснюється шляхом проміжного охолодження повітря, наприклад забортною водою, у спеціальному поверхневому теплообміннику – проміжному повітроохолоджувачі (ППО). Різні схеми ГТА з ППО показані на рис. 1, **в, ж**.

На рис. 4 зображений цикл ГТА з проміжним охолодженням повітря, схема якого відповідає рис. 1, **в**. Тут 1–2.1 – процес підвищення тиску повітря в компресорі до ППО, 2.1–1.2 – охолодження повітря в ППО, 1.2–2 – процес підвищення тиску в компресорі після ППО. Одержання істотного виграшу в економічності в реальному газотурбінному циклі виявляється можливим тільки при оптималь-

ному розміщенні ППО по тракту підвищення тиску, що може характеризуватися параметром розподілу роботи компресора

$$K_o = \frac{\Delta T_{\kappa_1}}{\Delta T_{\kappa}},$$

де ΔT_{κ_1} – підігрів повітря в компресорі до ППО; ΔT_{κ} – підігрів повітря в компресорі ГТА простої схеми при тому ж значенні π_{κ} .

Введення проміжного охолодження повітря в схему ГТА змінює як величину корисної роботи циклу – вона збільшується, так і повні енерговитрати в КЗ – вони зростають. Формула для визначення ефективного ККД циклу ГТА з проміжним охолодженням повітря має вигляд

$$\eta_e = \frac{\tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} \Pi_m - L \Pi_n \left[(1 - K_o) \frac{1 + \bar{\Delta}_o}{1 + K_o \Pi_n} + K_o \right]}{\tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} - (1 + \Pi_n) \frac{1 + \bar{\Delta}_o}{1 + K_o \Pi_n} - \left(\frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} - 1 \right) \frac{293}{T_1}} \eta_m \eta_{\text{КЗ}}. \quad (18)$$

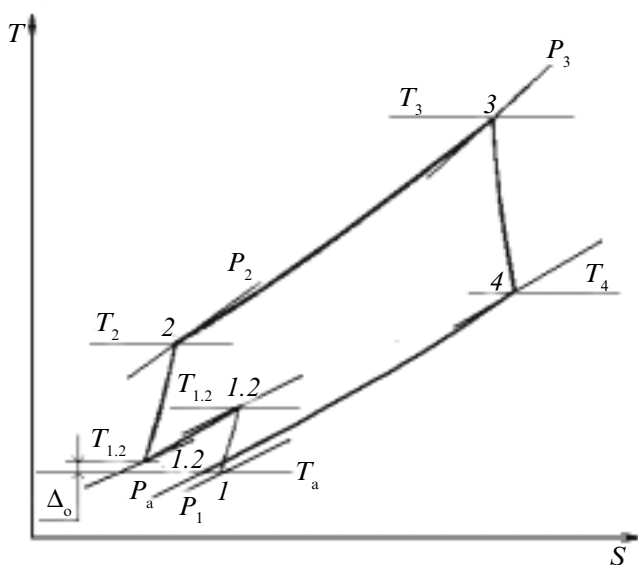


Рис. 4. Термодинамічний цикл ГТА з проміжним охолодженням повітря

У (18) параметр $\bar{\Delta}_o = \frac{\Delta_o}{T_1}$, а Δ_o – величина недоохолодження повітря після ППО до T_1 , взята при проектуванні рівною 6...10 град. Питома потужність циклу цього ГТА

$$N_{\text{епит}} = T_1 c_{p_b} (\beta - g_{\text{ox}}) \left(\tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} \Pi_m - L \Pi_n \right) \eta_m.$$

ППО створює додаткові втрати повного тиску по тракту ГТА, що враховується введенням у математичну модель коефіцієнта відновлення повного тиску в ППО $v_{\text{во}}$. У цьому випадку

$$v_{\Sigma} = v_{\text{вх}} v_{\text{во}} v_{\text{к}} v_{\text{кз}} v_{\text{т}} v_{\text{гв}}.$$

Відповідно до викладеної в розд. 1.1 постановки задачі при оптимізації параметрів циклу ГТА з проміжним охолодженням повітря цільова функція (2) буде мати вигляд

$$\eta_e = F(\pi_k, K_o; T_1, T_3, T_d, \eta_{\text{п}}, v_{\Sigma}, g_e, \eta_{\text{кз}}, \eta_{\text{м}}, \Delta_o).$$

У процесі оптимізації може використовуватися метод сканування по параметру π_k з заданим кроком $\Delta\pi_k$ у сполученні з градієнтним методом для параметра K_o . У такому випадку при кожному фіксованому значенні π_{k_i} розв'язується одне з рівнянь системи (3):

$$\frac{\partial \eta_e}{\partial K_o} = 0. \quad (19)$$

Принцип розв'язання рівняння (19) наступний. Запишемо (18) у вигляді

$$\eta_e = \frac{U}{V} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{кз}}. \quad (20)$$

Дослідження функції (18) показують, що вона безупинна, диференційована, унімодальна при накладенні обласних обмежень виду

$$0 < K_o < 1.$$

У цьому випадку (19) з урахуванням (20) може бути приведена до вигляду

$$F_{K_O} = U'_{K_O} V - U V'_{K_O}, \quad (21)$$

де U'_{K_O} і V'_{K_O} – перші похідні чисельника і знаменника цільової функції (20), які можна записати у вигляді

$$U'_{K_O} = L \Pi_n \left[(1 + \Pi_n) \frac{1 + \bar{\Delta}_o}{(1 + K_O \Pi_n)^2} - 1 \right];$$

$$V'_{K_O} = \Pi_n (1 + \Pi_n) \frac{1 + \bar{\Delta}_o}{(1 + K_O \Pi_n)^2}.$$

Рівняння (21) розв'язується методом Ньютона, легко реалізовуваним на ЕОМ при швидкій збіжності ітераційного процесу. Відповідно до цього методу кожне наступне наближення визначається як

$$K_{O_{i+1}} = K_{O_i} - \frac{F_{K_O}}{F'_{K_O}},$$

де F'_{K_O} – частинна похідна від F_{K_O} по K_O .

При цьому

$$F'_{K_O} = U''_{K_O} V - U V''_{K_O}. \quad (22)$$

У формулі (22) U''_{K_O} , V''_{K_O} – другі похідні чисельника і знаменника функції (20) по параметру K_O , визначаються як

$$U''_{K_O} = -2L \Pi_n^2 (1 + \Pi_n) \frac{1 + \bar{\Delta}_o}{(1 + K_O \Pi_n)^3};$$

$$V''_{K_O} = -2 \Pi_n^2 (1 + \Pi_n) \frac{1 + \bar{\Delta}_o}{(1 + K_O \Pi_n)^3}.$$

1.5. Особливості математичних моделей циклів ГТА з проміжним підігрівом газу

Карнотизація газотурбінного циклу по процесу розширення виконується шляхом введення в схему ГТА додаткових камер згоряння – камери згоряння проміжного підігріву газу (КЗПП) див. рис. 1,2,3. Термодинамічний цикл установки за схемою рис. 1, зображений на рис. 5. Відзначимо характерні для цього циклу процеси: $3-4$ – розширення газу в турбіні до КЗПП; $4-1-3$ – підігрівання газу в КЗПП; $3-4$ – розширення газу в турбіні після КЗПП.

Додатковою оптимізовуваною величиною для розглянутого циклу є параметр розподілу роботи турбіни

$$K_d = \frac{\Delta T_{T_1}}{\Delta T_T},$$

де ΔT_{T_1} – температурний перепад у турбіні до КЗПП; ΔT_T – температурний перепад у турбінах ГТД простого циклу при тому ж значенні π_T .

З введенням у схему ГТА КЗПП зростає як корисна робота тур-

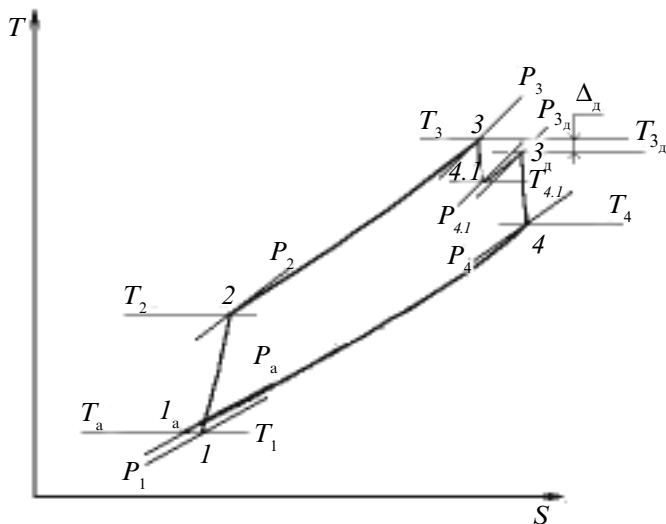


Рис. 5. Термодинамічний цикл ГТА з проміжним підігрівом газу

бін, так і повні енерговитрати в камерах згоряння. Тоді ефективний ККД циклу з проміжним підігрівом газу визначиться за формулою

$$\eta_e = \frac{\tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} \Pi_m \left[(1 - K_d) \frac{1 - \bar{\Delta}_d}{1 - K_d \Pi_m} + K_d \right] - L \Pi_n}{\tau \left[\frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} + \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} (K_d \Pi_m - \bar{\Delta}_d) \right] - (1 + \Pi_m) - \left(\frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} - 1 \right) \frac{293}{T_1}} \eta_m \eta_{K3}, \quad (23)$$

де $\bar{\Delta}_d = \Delta_d / T_3$; Δ_d – величина "недогріву" газу в КЗПП до T_3 .

Питома потужність циклу

$$N_{e_{\text{пит}}} = T_1 c_{p_b} (\beta - g_{\text{ox}}) \left\{ \tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} \Pi_m \left[(1 - K_d) \frac{1 - \bar{\Delta}_d}{1 - K_d \Pi_m} + K_d \right] - L \Pi_n \right\} \eta_m. \quad (24)$$

Сумарний коефіцієнт відновлення повного тиску по тракту ГТА визначається з урахуванням коефіцієнта відновлення повного тиску для КЗПП $\nu_{\text{КЗПП}}$ (береться 0,95...0,97) і може бути записаний у вигляді

$$\nu_{\Sigma} = \nu_{\text{вх}} \nu_{\kappa} \nu_{\text{КЗ}} \nu_{\text{КЗПП}} \nu_{\text{т}} \nu_{\text{гв}}.$$

Цільова функція (23) для розглянутого циклу спрощено записується у вигляді

$$\eta_e = F(\pi_{\kappa}, K_d; T_1, T_3, T_d, \eta_{\Pi}, \nu_{\Sigma}, g_e, \eta_{\text{КЗ}}, \eta_{\text{КЗПП}}, \eta_m, \Delta_d).$$

У процесі оптимізації циклу здійснюється сканування по параметру π_{κ} шляхом розв'язання на кожному кроці рівняння

$$\frac{\partial \eta_e}{\partial K_d} = 0 \quad (25)$$

з обласними обмеженнями виду $0 < K_d < 1$.

Аналогічно підходу, описаному в розд. 1.4, рівняння (25) приводиться до вигляду

$$F_{K_d} = U'_{K_d} V - UV'_{K_d}, \quad (26)$$

де U'_{K_d} і V'_{K_d} – перші похідні чисельника і знаменника цільової функції (23), записувані у вигляді

$$U'_{K_d} = \tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} \Pi_m \left[1 - (1 - \Pi_m) \frac{1 - \bar{\Delta}_d}{(1 - K_d \Pi_m)^2} \right];$$

$$V'_{K_d} = \tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} \Pi_m.$$

При розв'язанні рівняння (26) методом Ньютона кожне наступне наближення визначається з використанням параметра

$$K_{d_{i+1}} = K_{d_i} - \frac{F_{K_d}}{F'_{K_d}},$$

де F'_{K_d} – частинна похідна від F_{K_d} по K_d .

Тут

$$F'_{K_d} = U''_{K_d} V - UV''_{K_d},$$

при цьому

$$U''_{K_d} = -2\tau \frac{c_{p_r}}{c_{p_b}} \Pi_m^2 (1 - \Pi_m) \frac{1 - \bar{\Delta}_d}{(1 - K_d \Pi_m)^3};$$

$$V''_{K_d} = 0.$$

Аналогічний підхід використовується при оптимізації параметра $N_{\text{пит}}$ (24) у процесі розв'язання рівняння

$$\frac{\partial N_{\text{пит}}}{\partial K_d} = 0.$$

1.6. Математичні моделі циклів комбінованих ГТА з ТУК

Найбільш перспективним способом підвищення ефективності ГТА в даний час вважається утилізація теплоти відхідних газів ГТД у пароводяному теплоутилізаційному контурі, що працює за циклом Ренкіна. Різні схеми подібних комбінованих ГТА з ТУК показані на рис. 1, *д, е, з*.

Термодинамічний цикл ГТА з ТУК, виконаного за схемою рис. 1, *д*, показаний на рис. 6. Процес 4–6 у циклі ГТД – охолодження газів, що надходять із ГТД в УПГ. У пароводяному циклі здійснюються процеси: 10–11 – підігрівання води в економайзері і випарному УПГ до температури кипіння T_{11} ; 11–12 – паротворення в УПГ; 12–13 – перегрів пари в пароперегрівнику УПГ; 13–14 – розширення пари в паровій турбіні; 14–16 – конденсація пари в конденсаторі ТУК.

Ефективний ККД циклу комбінованого ГТА з ТУК може бути записаний у вигляді

$$\eta_e = \frac{q_{\text{кор}} + q_{\text{к.у}}}{q_{\text{КЗ}}} \eta_m, \quad (27)$$

де $q_{\text{к.у}}$ – додаткова корисна енергія, вироблювана ПТ у ТУК,

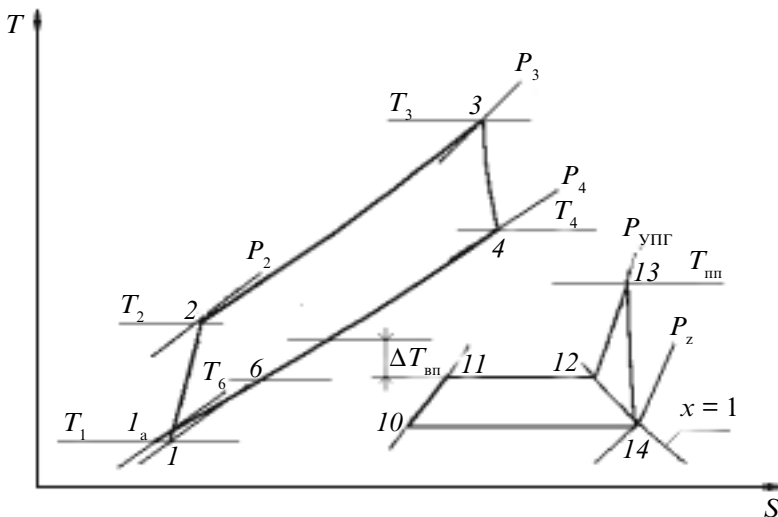


Рис. 6. Термодинамічний цикл комбінованого ГТА з ТУК

$$q_{к.у} = G_{\Gamma} c_{p_{\Gamma}} \Delta T_{к.у} \eta_{пт}, \quad (28)$$

де $\Delta T_{к.у}$ – умовний розраховуваний температурний перепад у ТУК. Він визначається за формулою

$$\Delta T_{к.у} = \frac{(T_4 - T_{11} - \Delta T_{вп})(h_{13} - h_{ar})}{h_{13} - h_{11}}, \quad (29)$$

де h_{ar} – ентальпія кінця ізоентропійного розширення пари в ПТ; $\Delta T_{вп}$ – мінімальний температурний перепад за ВП УПП.

У результаті оптимізації параметрів ТУК була отримана залежність максимальної величини $\Delta T_{к.у}$ від температури газу T_4 на вході в УПП у вигляді багаточлена другого порядку:

$$\Delta T_{к.у} = B_0 + B_1 T_4 + B_2 T_4^2. \quad (30)$$

У такому випадку температура газу на вході в УПП

$$T_4 = T_1 \tau (1 - \Pi_m).$$

З урахуванням формул (28), (29), (30) вираз (27) набуває вигляду

$$\eta_c = \frac{\tau \frac{c_{p_{\Gamma}}}{c_{p_{\text{в}}}} \Pi_m - L \Pi_n + \frac{\eta_{пт}}{(\beta - g_{\text{ox}})} \left(\frac{B_0}{T_1} + B_1 \tau_4 + B_2 T_1 \tau_4^2 \right)}{\frac{c_{p_{\Gamma}}}{c_{p_{\text{в}}}} \tau - (1 + \Pi_n) - \left(\frac{c_{p_{\Gamma}}}{c_{p_{\text{в}}}} - 1 \right) \frac{293}{T_1}} \eta_m \eta_{кз},$$

де $\tau_4 = T_4 / T_1$.

Питома потужність комбінованого циклу ГТА з ТУК

$$N_{\text{е}_{пт}} = T_1 c_{p_{\text{в}}} (\beta - g_{\text{ox}}) \left[\tau \frac{c_{p_{\Gamma}}}{c_{p_{\text{в}}}} \Pi_m - L \Pi_n + \frac{\eta_{пт}}{(\beta - g_{\text{ox}})} \left(\frac{B_0}{T_1} + B_1 \tau_4 + B_2 T_1 \tau_4^2 \right) \right] \eta_m.$$

Сумарний коефіцієнт відновлення повного тиску по тракту ГТД визначається з урахуванням коефіцієнта відновлення повного тиску в УПП $\eta_{упг}$, величина якого береться рівною 0,96...0,97.

ється охолодження продуктів згоряння до температури T_3 при їхньому змішуванні з перегрітою водяною парою. Процес $3-4_{\text{г}}$ – розширення продуктів згоряння в складі суміші в турбінах ГТД, а $4_{\text{г}}-6_{\text{г}}$ – охолодження продуктів згоряння в УПГ до температури T_6 . У парогазовому конденсаторі відбувається подальше охолодження продуктів згоряння – процес $6_{\text{г}}-7_{\text{г}}-8_{\text{г}}$, а $8_{\text{г}}-1_{\text{а}}$ – умовний процес замикання пароповітряного циклу в атмосфері. У пароводяному циклі відбуваються наступні процеси: $8-9$ – підігрівання води в УПГ до температури кипіння, $9-10$ – генерація пари в УПГ, $10-11$ – пароперегрівання в УПГ. Упорскування пари в КЗ ГТД – процес $11-11'$, а подальше перегрівання пари в КС при змішуванні з продуктами згоряння – $11'-3_{\text{п}}$. Розширення пари в турбінах – $3_{\text{п}}-4_{\text{п}}$, а $4_{\text{п}}-6_{\text{п}}$ – процес охолодження пари в складі суміші в УПГ. У ПГК у процесі $6_{\text{п}}-12$ відбувається охолодження пари до початку процесу конденсації, а потім процес конденсації пари з газопаровою суміші $12-8$.

Ефективний ККД циклу контактного ГТА з ТУК з охолодженням лопаток турбін сухою насиченою парою, укрупнено може бути записано у вигляді

$$\eta_{\text{е}} = \frac{\left[\left(1 + \frac{1}{\alpha L_0} \right) \beta + g_{\text{пп}} \right] c_{p_{\text{гп}}} \Delta T_{\text{т}} + g_{\text{пох}} c_{p_{\text{гп}}} \Delta T_{\text{тох}} - c_{p_{\text{в}}} \Delta T_{\text{к}}}{q_{\text{кз}_{\text{г}}} + q_{\text{кз}_{\text{п}}}} \eta_{\text{м}}, \quad (31)$$

де $\Delta T_{\text{т}}$ – дійсний розраховуваний температурний перепад газопарових турбін; $\Delta T_{\text{тох}}$ – дійсний температурний перепад у турбінах по охолодній парі; $\Delta T_{\text{к}}$ – дійсний температурний перепад у компресорі ГТД.

Математична модель теплопідведення в КЗ – знаменник формули (31) – передбачає роздільне визначення кількості тепла, необхідного для підігрівання газу ($q_{\text{кз}_{\text{г}}}$) і для перегрівання впорскуваної пари ($q_{\text{кз}_{\text{п}}}$). Величина $q_{\text{кз}_{\text{г}}}$ визначається за виразом (10), записаним для 1 кг витрати робочого тіла. Для пари маємо:

$$q_{\text{кз}_{\text{п}}} = \frac{(h_{3_{\text{п}}} - h_{13_{\text{п}}}) g_{\text{пп}}}{\eta_{\text{кз}}}, \quad (32)$$

де $h_{3_{\text{п}}}$, $h_{13_{\text{п}}}$ – ентальпії пари у відповідних точках циклу, визначаються при її парціальних тисках $P_{3_{\text{п}}}$ і $P_{13_{\text{п}}}$.

Величина паровидатності УПГ по перегрітій парі, що входить у формули (31) і (32),

$$g_{\text{пп}} = \frac{\left[\left(1 + \frac{1}{\alpha L_0} \right) + g_{\text{п_ок}} \right] c_{p_{\text{гп}}} (T_4 - T_{\text{вп}}) - g_{\text{п_ок}} (h_{12} - h_{11})}{(h_{13} - h_{11}) - c_{p_{\text{гп}}} (T_4 - T_{\text{вп}})}, \quad (33)$$

де $T_{\text{вп}} = T_{11} + \Delta T_{\text{вп}}$ – температура газопарової суміші за ВП УПГ, у розрахунках величина $\Delta T_{\text{вп}}$ приймається 15...30 град; h_{11} – ентальпія води на лінії насичення при тиску в сепараторі УПГ.

При визначенні параметрів води і пари в УПГ варто враховувати, що тиск пари в сепараторі парогенератора визначається співвідношенням

$$P_{\text{УПГ}} = \frac{P_{\text{а}} v_{\text{вх}} v_{\text{к}} \pi_{\text{к}}}{v_{\text{пп}}},$$

де $v_{\text{пп}} = 0,90...0,96$ – коефіцієнт, що враховує втрати повного тиску пари в паропроводі і запірній арматурі на ділянці від УПГ до КЗ ГТД.

У записаних вище формулах (30)–(33) теплофізичні властивості газопарової суміші, а також параметри водяної пари визначаються з урахуванням змінного відносного паровмісту

$$d_{\text{п}} = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{гп}}},$$

який являє собою відношення маси пари в суміші до витрати самої газопарової суміші. У цьому випадку відносний вміст газу в суміші

$$d_{\text{г}} = 1 - d_{\text{п}}.$$

Парціальний тиск пари в суміші для будь-якої точки циклу визначається за формулою

$$P_{\text{п}} = P_{\text{гп}} d_{\text{п}} \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{гп}}}.$$

Газова стала суміші

$$R_{\text{гп}} = R_{\text{г}} d_{\text{г}} + R_{\text{п}} d_{\text{п}},$$

де $R_{\text{г}}$ – газова стала продуктів згоряння вуглеводневого палива, береться 288 Дж/(кг·К); $R_{\text{п}}$ – газова стала водяної пари, дорівнює 461 Дж/(кг·К).

Середня масова теплоємність газопарової суміші

$$c_{p_{\text{гп}}} = c_{p_{\text{г}}} d_{\text{г}} + c_{p_{\text{п}}} d_{\text{п}},$$

де $c_{p_{\text{г}}}$, $c_{p_{\text{п}}}$ – середні масові теплоємності продуктів згоряння і водяної пари; визначаються за таблицями або обчислюються з використанням відповідних апроксимуючих поліномів.

Питома потужність циклу контактного ГТА з ТУК

$$N_{\text{е}_{\text{шт}}} = \left\{ \left[\left(1 + \frac{1}{\alpha L_0} \right) \beta + g_{\text{шт}} \right] c_{p_{\text{гп}}} \Delta T_{\text{т}} + g_{\text{п}_{\text{ок}}} c_{p_{\text{гп}}} \Delta T_{\text{т}_{\text{ок}}} - c_{p_{\text{в}}} \Delta T_{\text{к}} \right\} \eta_{\text{м}}.$$

2. АЛГОРИТМИ І ПРОГРАМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЦИКЛІВ СУДНОВИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ГТА

2.1. Алгоритм і програма "GTA1CC" оптимізації параметрів циклів ГТА

Розроблений алгоритм дозволяє здійснювати оптимізацію параметрів газотурбінних циклів восьми різних теплових схем ГТА. При роботі з програмою тип схеми ГТА, дослідження циклу якого проводиться, задається у початкових даних ознакою циклу J відповідно до табл. 1.

Таблиця 1

Тип схеми ГТА	Ознака циклу
ГТА простої схеми	1
ГТА з регенерацією теплоти відхідних газів ГТД	2
ГТА з ТУК	3
ГТА з регенерацією і ТУК	4
ГТА з проміжним охолодженням повітря	5
ГТА з проміжним охолодженням і регенерацією	6
ГТА з проміжним підігрівом газу	7
ГТА з проміжним підігрівом і ТУК	8

Усі розглянуті схеми ГТА, у залежності від числа оптимізованих параметрів, можуть бути розбиті на дві групи. Для першої групи ($J = 1, 2, 3, 4$) цільова функція залежить тільки від однієї змінної π_k , а для другої групи схем ($J = 5, 6, 7, 8$) – від двох змінних: π_k і K_o або π_k і K_d .

Відповідно до вищевикладеного в розд. 1.1, 1.4, 1.5 алгоритм передбачає різний підхід до розв'язання задачі оптимізації схем ГТА першої і другої груп. Так, для схем з $J = 1, 2, 3, 4$ застосований найбільш простий і зручний метод сканування. При цьому на точність і тривалість процесу розв'язання впливають вибір інтервалу і кроку пошуку. Область зміни параметра π_k – інтервал пошуку, в якому очікується максимум η_c , – завжди може бути зазначена з великою вірогідністю. Крок сканування $\Delta\pi_k$ варто підбирати емпірично.

Для схем другої групи передбачене сполучення методу сканування по параметру π_k і градієнтного метода по параметру K_o або K_d .

На рис. 8 показана блок-схема алгоритму програми. Після запуску програми у блоці 2 здійснюється введення з файлу **isgta1cc.dat**, а потім роздруковування для контролю вихідних даних програми. У блоці 4 відбувається формування початкових значень параметрів π_k, K_o, K_d , а в наступному здійснюється їхнє коректування. Блок 5 служить для обчислення значень параметрів $c_{p_r}, c_{p_b}, k_r, k_b$. Перевірка необхідності здійснювати охолодження турбін ГТД виконується блоком 6. Якщо охолодження турбін необхідне, то в блоці 7 виконується розрахунок потрібної кількості охолоджуючого повітря, коректується ККД турбін, оцінюється кількість охолоджуваних вінців турбін. В іншому випадку ці розрахунки не виконуються, а керування передається на блок 8, де відбувається обчислення значень чисельника U і знаменника V цільової функції η_c . Блоки 9 і 10 служать для розпізнавання схем ГТА з проміжним охолодженням повітря (схеми з $J = 5$ і 6) і проміжним підігріванням газу (схеми з $J = 7$ і 8), а також формування подальшого обчислювального процесу. Якщо розраховуються схеми, що мають ознаку $J = 7$ або $J = 8$, то в блоці 11 обчислюються перші і другі похідні чисельника і знаменника цільової функції по параметру K_d , а якщо $J = 5$ або $J = 6$, то аналогічні величини по параметру K_o в блоці 12. Потім у блоці 13 розраховується значення F_k , а в блоці 14 здійснюється перевірка досягнутої точності розв'язуваних методом Ньютона рівнянь (21) або (26). Якщо задана точність розв'язку у ε_F не досягнута, то після обчислення в блоці 15

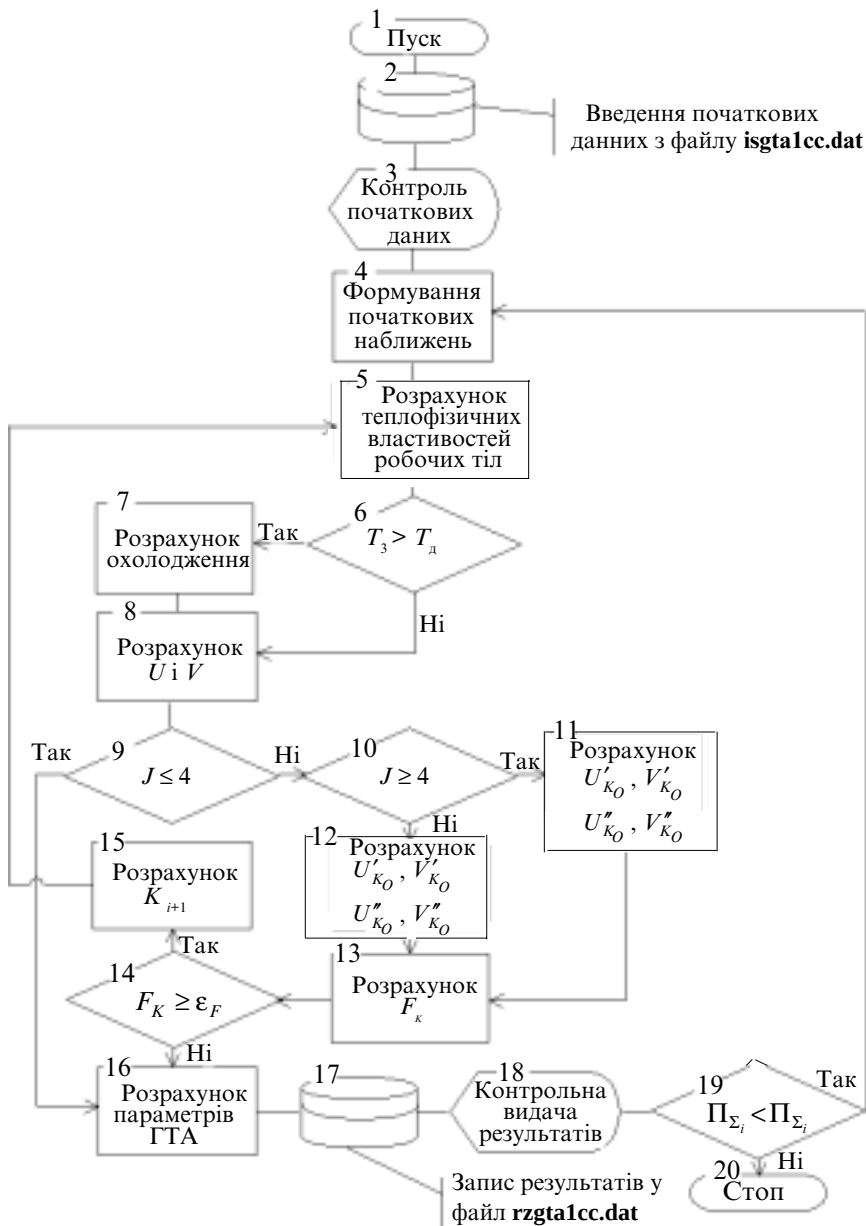


Рис. 8. Структурно-логічна схема алгоритму програми "GTA1CC"

нового значення $K_{O_{i+1}}$ або $K_{д_{i+1}}$ здійснюється наступне наближення з поверненням на блок 5. В іншому випадку у блоці 16 обчислюються всі необхідні показники і параметри циклу ГТА при даному значенні параметра π_k . Далі блок 18 видає результат на екран дисплея, а блок 17 записує результат у вихідний файл **rzgta1cc.dat**. Блок 19 перевіряє необхідність здійснення наступного кроку по π_k і, якщо він необхідний, передає керування на блок 4.

Програма "GTA1CC" написана алгоритмічною мовою ФОРТ-РАН-77 і входить у комплект програмного забезпечення для ПК, розробленого на кафедрі турбін УДМТУ для студентів спеціальності 7.090506. Список основних ідентифікаторів програми, їхніх умовних позначок у математичній моделі, розмірностей використовуваних величин в обсязі, необхідному для заповнення початкових даних і розшифрування результатів розрахунку, подано у табл. 2.

Таблиця 2

Ідентифікатор	Найменування величини	Умовна позначка	Одиниця вимірювання
ALO	Коефіцієнт надлишку повітря в КЗ ГТД	α_0	—
BD	Недогрів газу в КЗПП	Δ_d	град
BO	Недоохолодження повітря в ППО	Δ_o	град
EGE	Питома витрата охолоджуючого повітря	g_e	—
GOX	Відносна витрата охолодного повітря	g_{ox}	—
HBO	Коефіцієнт відновлення повного тиску (КВПТ) для ППО	v_{bo}	—
HBX	КВПТ вхідного пристрою	v_{bx}	—
HNO	КВПТ газівідвідного пристрою	v_{gv}	—
HK	КВПТ перехідників компресорів	v_k	—
HKS	КВПТ основний КЗ	$v_{kз}$	—
HKSD	КВПТ КЗПП	$v_{kзпп}$	—
HKY	КВПТ утилізаційного парогенератора	$v_{упг}$	—
HR	КВПТ регенератора	v_p	—
HT	КВПТ опорних вінців турбін	v_t	—

Продовж. табл. 2

Ідентифі- катор	Найменування величини	Умовна позначка	Одиниця вимірю- вання
HU	Питома потужність ГТА	$N_{\text{пт}}$	$\frac{\text{кВт}}{\text{кг/с}}$
J	Ознака схеми ГТА	J	—
KO	Параметр розподілу роботи компресора	K_O	—
KD	Параметр розподілу роботи турбіни	K_D	—
NOX	Число рядів охолоджуваних лопаток	$n_{\text{ох}}$	—
ONPT	Відносна потужність ПТ	$\overline{N}_{\text{пт}}$	—
QK	Загальний ступінь підвищення тиску у циклі (ЗСПТ)	π_k	—
QKH	Початкове значення ЗСПТ	$\pi_{k_{\text{п}}}$	—
QKK	Кінцеве значення ЗСПТ	π_{k_k}	—
R	Ступінь регенерації	r	—
SQK	Крок спуска по ЗСПТ	$\Delta\pi_k$	—
TD	Допустима температура металу лопаток	T_d	К
TH	Температура зовнішнього повітря	T_a	К
T2	Температура повітря за компресором ГТД	T_2	К
T3	Температура газу перед ТВТ ГТД	T_3	К
T4	Температура газу за турбінами ГТД	T_4	К
UKS	Коефіцієнт повноти згоряння в КЗ	$\eta_{\text{КЗ}}$	К
UM	Механічний ККД ГТД	$\eta_{\text{м}}$	
UPK	ККД елементарного ступеня компресора	$\eta_{\text{пк}}$	
UPT	ККД елементарного ступеня турбіни	$\eta_{\text{пт}}$	
UTE	Ефективний ККД циклу ГТА	η_e	
UTP	Внутрішній ККД утилізаційної ПТ	$\eta_{\text{пт}}$	

Числові значення ознаки схеми ГТА береться відповідно до табл. 1.

Початкові дані для розрахунку варіанта готуються студентом шляхом редагування файла **isgta1cc.dat**, що знаходиться в директорії **GRUP5**, розміщеній в каталозі **STUDENT**, який, у свою чергу, зареєстрований у кореневому каталозі твердого диска ПК. Редагування файла **isgta1cc.dat** здійснюється екранним редактором. При використанні програмної оболонки "Norton Commander" це може бути її вбудований редактор, викликуваний натисканням функціональної клавіші [F4], або редактор мови ФОРТРАН 77 WEDIT, використовуваний у резидентному режимі при запуску компілятора. Так, при використанні компілятора WATFOR 77/87 це файл **watfor77.exe**, що знаходиться в директорії компілятора. На рис. 9 наведено приклад заповнення файла **isgta1cc.dat**.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛА ГТА

Студент гр. 551 Шевченко О.О.

01.ПРИЗНАК ЦИКЛА	1
02.ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА ПЕРЕД ТВД ГТД,К	1300.0
03.ТЕМПЕРАТУРА НАРУЖНОГО ВОЗДУХА,К	298.0
04.ДОПУСТИМАЯ ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА ЛОПАТОК,К	1060.0
05.КПД ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА	0.9000
06.КПД ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ	0.9000
07.МЕХАНИЧЕСКИЙ КПД ГТД	0.9750
08.КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ КС	0.9900
09.НАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ОК	6.00
10.КОНЕЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ОК	25.00
11.ШАГ СПУСКА ПО ОК	1.00
12.КВПД ДЛЯ ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА	0.9800
13.КВПД ДЛЯ ПЕРЕХОДНИКОВ КОМПРЕССОРОВ	0.9950
14.КВПД ДЛЯ ОСНОВНОЙ КС	0.9400
15.КВПД ДЛЯ ОПОРНЫХ ВЕНЦОВ ТУРБИН	0.9950
16.КВПД ДЛЯ ГАЗООТВОДНОГО УСТРОЙСТВА	0.9800
17.УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА	0.0240
18.КВПД ДЛЯ РЕГЕНЕРАТОРА	1.0000
19.СТЕПЕНЬ РЕГЕНЕРАЦИИ	0.0000
20.КВПД ДЛЯ УТИЛИЗАЦИОННОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА	1.0000
21.ВНУТРЕННИЙ КПД УТИЛИЗАЦИОННОЙ ПТ	0.0000
22.НЕДООХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА В ПВО,ГРАД.	0.000
23.КВПД ДЛЯ ПВО	1.0000
24.НЕДОГРЕВ ГАЗА В КСПП,ГРАД	0.0000
25.КВПД ДЛЯ КСПП	1.0000

Рис. 9. Приклад файла початкових даних **isgta1cc.dat** програми "GTAICC"

Запуск програми на рахунок здійснюється файлом **gtalcc.exe**, розміщеним в директорії **SAPRTA**, що також знаходиться у вищезгаданому каталозі **STUDENT**. Після запуску програми на екран ПК видається список вихідних даних у формі, аналогічній змісту файла **isgtalcc.dat**, а потім результати розрахунку у табличному вигляді (дод. 1). Видача здійснюється построково для кожного значення π_k у сканованому інтервалі зміни цього параметра. Розшифровування ідентифікаторів програми в заголовку виконується за даними табл. 2. Паралельно з роботою програми відбувається запис кожного кроку обчислення на твердий диск у файл **rzgtalcc.dat**, який також розміщується в директорії **GRUP5**.

Перш ніж роздруковувати результати розрахунку на папір, варто проаналізувати отриманий результат і переконатися в дійсній необхідності одержання твердої копії розрахованого варіанта. При роботі в програмній оболонці "Norton Commander" для цього можна використовувати вбудовану програму-переглядач – клавіша [F3]. Одержати тверду копію варіанта можна за допомогою команди COPY, викликавши її клавішею [F5] і переадресувавши файл, що копіюється, на принтер, ввівши в діалоговому вікні програми команду PRN.

Приклад результуючого файла **rzgtalcc.dat** програми "GTA1CC", отриманого після розрахунку з початковими даними рис. 9, наведений у дод. 1.

2.3. Алгоритм і програма "GTA1CK" оптимізації параметрів циклу контактного ГТА з ТУК

Алгоритм програми оптимізації параметрів контактного ГТА з ТУК розроблений з використанням викладених у підрозд. 1.7 основних положень математичного моделювання подібного циклу. Структура алгоритму програми "GTA1CK" наведена на рис. 10. Після введення початкових даних блоком 2, попередньо підготовлених на магнітному диску, блок 4 здійснює формування початкових наближень для розрахунку процесу підвищення тиску в компресорі ГТД.

Після розрахунку процесу в компресорі, що виконується блоком 5, блок 6 формує початкові наближення для розрахунку процесу в КЗ, а також у турбінах ГТД. Найважливішим параметром, яким варто тут задатися, є початкове значення питомої паровидатності УПГ по перегрітій парі $g_{\text{ппп}}$. Надалі цей параметр багаторазово уточ-

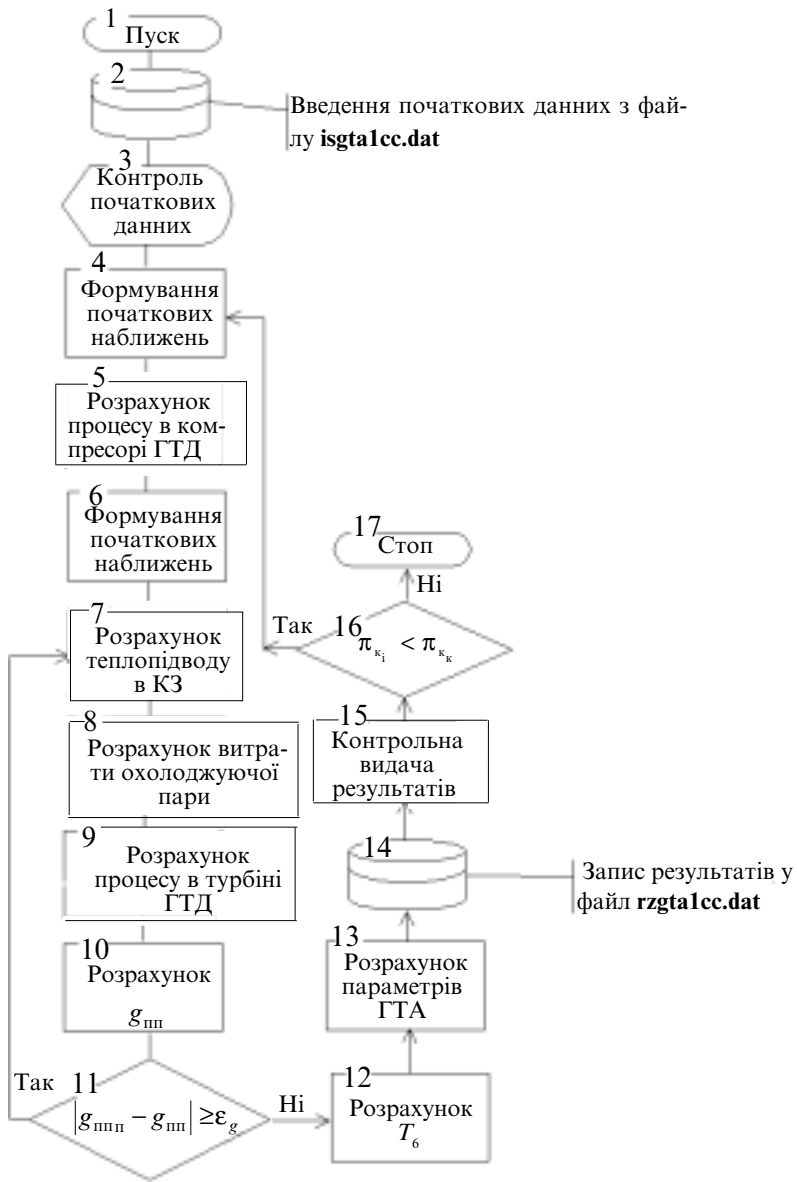


Рис. 10. Структурно-логічна схема алгоритму програми "GTA1CK"

нюється. Після виконання блоком 7 розрахунків теплоподводу в КЗ виконується оцінка відносних витрат насиченої пари, що відбирається із сепаратора УПГ для охолодження лопаток турбін (блок 8).

Розрахунок процесу розширення газопарової суміші в турбінах ГТД виконується блоком 9, а потім у блоці 10 обчислюється дійсне значення, для поточного наближення, величини відносної паровидатності УПГ по перегрітій парі $g_{\text{пп}}$. Блок 10 здійснює порівняння поточного і прийнятого в попередньому наближенні значення параметра $g_{\text{ппп}}$. Якщо похибка розрахунку не перевищує заданої ε_g , то відбувається перехід на блок 11, а в протилежному випадку параметру $g_{\text{ппп}}$ присвоюється значення $g_{\text{пп}}$ і керування передається блоку 7. У блоці 12 розраховується рівень температури T_6 за УПГ, а в блоці 13 обчислюються основні показники ефективності ГТА η_c і $N_{\text{спит}}$ для поточного значення параметра π_k . Потім для контролю результатів відбувається їхня видача на екран дисплея (блок 15) і запис на магнітний диск (блок 14). У блоці 16 виконується перевірка умови охоплення всього сканованого інтервалу значень ступеня підвищення тиску в циклі від $\pi_{kп}$ до π_{kk} . Якщо сканування не закінчене, то поточному значенню параметра π_{k_i} присвоюється значення $(\pi_{k_i} + \Delta\pi_k)$ і керування передається на блок 4. У протилежному випадку робота програми закінчується.

Програма "GTAICK" написана алгоритмічною мовою ФОРТ-РАН 77 і також входить у згаданий вище комплект програмного забезпечення для ПК, розробленого на кафедрі турбін УДМТУ для студентів спеціальності 7.090506. Список основних ідентифікаторів програми, необхідний для розшифровки результатів розрахунку, наводиться в табл. 4.

Таблиця 4

Ідентифікатор	Найменування величини	Умовна позначка	Одиниця вимірювання
AL	Коефіцієнт надлишку повітря в КЗ ГТД	α_0	—
NEYD	Питома потужність ГТА	$N_{\text{спит}}$	кВт/(кг/с)
OGOX	Відносна витрата сухого насиченої пари на охолодження лопаток турбін	$g_{\text{пох}}$	—

Продовж. табл. 4

Ідентифікатор	Найменування величини	Умовна позначка	Одиниця вимірювання
OGPP	Відносна продуктивність УПГ по перегрітій парі, подаваній у КЗ ГТД	$g_{\text{пп}}$	–
QKN	Поточне значення ступеня підвищення тиску в циклі	π_{ki}	–
T4	Температура газопарової суміші за турбінами ГТД	T_4	К
T6	Температура газопарової суміші за УПГ	T_6	К
TRP	Температура перегрітої пари, подаваної в КЗ ГТД	$T_{\text{пп}}$	К
UE	Ефективний ККД ГТА	η_e	–

Розшифровка ідентифікаторів початкових даних міститься безпосередньо в тексті файла початкових даних **isgta1ck.dat**.

2.4. Підготовка початкових даних і порядок роботи з програмою "GTA1CK" на ПК IBM PC

При підготовці початкових даних до розрахунку параметрів ГТА можна користатися рекомендаціями [1,4,7], конспектом лекцій, а також матеріалами розд. 1.7. На рис. 11 показаний зразок заповнення початкових даних для розрахунку одного варіанта параметрів контактного ГТА з ТУК у вигляді файла **isgta1ck.dat**, що також знаходиться в директорії **GRUP5**, розміщеній в каталозі **STUDENT**. Користуючись рекомендаціями розд. 2.2, необхідно виконати редагування цього файла, заносючи у його текст необхідні розрахункові значення.

Запуск програми на рахунок виконується файлом **gta1ck.exe**, розміщеним у директорії **SAPRTA**, що теж знаходиться в каталозі **STUDENT**. Після запуску програми на екран ПК здійснюється видача списку початкових даних у тій же формі, що наведено на рис. 11, а потім у вигляді таблиці з відповідним заголовком виводяться результати розрахунку. Приклад видачі результатів розрахунку на екран

ПК наведено у дод. 2. Паралельно з роботою програми проводиться запис кожного кроку обчислень для поточного значення параметра π_k на твердий диск у файл **rzgta1ck.dat**, що також розміщується в директорії **GRUP5**.

Після аналізу результату розрахунку варіанта, користуючись рекомендаціями розд. 2.2, можна одержати тверду копію файла **rzgta1ck.dat**, роздрукувавши його на принтері ПК.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛА КГТА

СТУДЕНТ: гр. 651 Агрызков А.А.

01. ПРИЗНАК ТИПА ТОПЛИВА, IRT (1-ГАЗОТУРБИННОЕ; 2-ПРИРОДН. ГАЗ)	1
02. ТЕМПЕРАТУРА СМЕСИ ПЕРЕД ТВД, ТЗН, К	1300.0
03. ТЕМПЕРАТУРА НАРУЖНОГО ВОЗДУХА, ТН, К	288.0
04. ДОПУСТИМАЯ ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА ЛОПАТОК, ТД, К	1060.0
05. МАКСИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПАРОПЕРЕГРЕВА, ТРРМ, К	650.0
06. МИНИМАЛЬНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ НАПОР ЗА ПП УПГ, ДТРР, ГРАД.	40.0
07. МИНИМАЛЬНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ НАПОР ЗА ИП УПГ, ДТІР, ГРАД.	16.0
08. К. П. Д. РЕДУКТОРА, UR	0.9800
09. К. П. Д. ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА, UAK	0.8900
10. К. П. Д. ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ, UAT	0.9000
11. К. П. Д. КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, UKS	0.9900
12. МЕХАНИЧЕСКИЙ К. П. Д. ТУРБИН, UMT	0.9950
13. НАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ОБЩЕЙ СТЕПЕНИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, QKH	10.00
14. КОНЕЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ОБЩЕЙ СТЕПЕНИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, QKK	25.00
15. ШАГ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЩЕЙ СТЕПЕНИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, DQK	1.00
16. К. В. П. Д. ПЕРЕХОДНИКА КОМПРЕССОРА, НК	0.9950
17. К. В. П. Д. ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА, НВХ	0.9850
18. К. В. П. Д. ТРАКТА ПОДВОДА ПАРА В КС, НРР	0.9400
19. К. В. П. Д. КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, НКС	0.9650
20. К. В. П. Д. ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОПОРНОГО ВЕНЦА ТУРБИНЫ, НТ	0.9950
21. К. В. П. Д. ГАЗООТВОДНОГО УСТРОЙСТВА, ННО	0.9850
22. К. В. П. Д. УПГ, НУРН	0.9700
23. К. В. П. Д. ПГК, НРНК	0.9700
24. ЭТАЛОН. ЗНАЧЕНИЕ КОЭФ. РАСХОДА ОХЛ. ВОЗДУХА, OGE	0.0220
25. ТЕМПЕРАТУРА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ, ТРВ, К	312.0

Рис. 11. Приклад файла початкових даних **isgta1ck.dat** програми "GTAICK"

ДОДАТОК 1

Приклад результирующего файла **rzgta1cc.dat** программы "GTAICC"

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПОДПРОГРАММА GTAICC
РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ГТУ ПРОСТОГО ЦИКЛА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЕТУ
Студент гр. 551 Шевченко О.О.

01.ПРИЗНАК ЦИКЛА	1
02.ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА ПЕРЕД ТВД ГТД,К	1300.0
03.ТЕМПЕРАТУРА НАРУЖНОГО ВОЗДУХА,К	298.0
04.ДОПУСТИМАЯ ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА ЛОПАТОК,К	1060.0
05.КПД ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА	0.9000
05.КПД ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ	0.9000
06.МЕХАНИЧЕСКИЙ КПД ГТА	0.9750
07.КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ КС	0.9900
08.НАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ QK	6.00
09.КОНЕЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ QK	25.00
10.ШАГ СПУСКА ПО QK	1.00
12.КВПД ДЛЯ ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА	0.9800
13.КВПД ДЛЯ ПЕРЕХОДНИКОВ КОМПРЕССОРОВ	0.9950
14.КВПД ДЛЯ ОСНОВНОЙ КС	0.9400
15.КВПД ДЛЯ ОПОРНЫХ ВЕНЦОВ ТУРБИН	0.9950
16.КВПД ДЛЯ ГАЗООТВОДНОГО УСТРОЙСТВА	0.9800
17.УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА	0.0240
18.КВПД ДЛЯ РЕГЕНЕРАТОРА	1.0000
19.СТЕПЕНЬ РЕГЕНЕРАЦИИ	0.0000
20.КВПД ДЛЯ УТИЛИЗАЦИОННОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА	1.0000
21.ВНУТРЕННИЙ КПД УТИЛИЗАЦИОННОЙ ПТ	0.0000
22.НЕДООХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА В ПВО,ГРАД.	0.00
23.КВПД ДЛЯ ПВО	1.0000
24.НЕДОГРЕВ ГАЗА В КСПП,ГРАД.	0.00
25.КВПД ДЛЯ КСПП	1.0000

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

QK	UTE	HU	KO	KD	T2	T4	ONPT	NOX	GOX	ALO
6.0	0.25403	216.6	0.000	0.000	523.0	903.8	0.000	2.5	0.0292	3.17
7.0	0.27065	223.6	0.000	0.000	548.1	872.9	0.000	2.5	0.0302	3.26
8.0	0.28391	227.7	0.000	0.000	570.6	846.8	0.000	2.5	0.0312	3.36
9.0	0.29465	229.9	0.000	0.000	591.2	824.3	0.000	2.5	0.0323	3.45
10.0	0.30346	230.5	0.000	0.000	610.1	804.6	0.000	2.5	0.0333	3.54
11.0	0.31074	230.2	0.000	0.000	627.6	787.1	0.000	2.5	0.0344	3.62
12.0	0.31676	229.0	0.000	0.000	644.0	771.4	0.000	2.5	0.0355	3.70
13.0	0.32174	227.2	0.000	0.000	659.4	757.1	0.000	2.5	0.0366	3.79
14.0	0.32585	224.9	0.000	0.000	673.9	744.1	0.000	2.5	0.0377	3.87
15.0	0.32919	222.2	0.000	0.000	687.7	732.2	0.000	2.5	0.0389	3.95
16.0	0.33188	219.2	0.000	0.000	700.8	721.2	0.000	2.5	0.0400	4.04
17.0	0.33398	215.9	0.000	0.000	713.2	710.9	0.000	2.5	0.0412	4.12
18.0	0.33556	212.5	0.000	0.000	725.1	701.4	0.000	2.5	0.0425	4.20
19.0	0.33667	208.9	0.000	0.000	736.5	692.5	0.000	2.5	0.0437	4.28
20.0	0.33734	205.1	0.000	0.000	747.5	684.1	0.000	2.5	0.0450	4.36
21.0	0.33761	201.2	0.000	0.000	758.0	676.2	0.000	2.5	0.0464	4.44
22.0	0.33751	197.3	0.000	0.000	768.2	668.7	0.000	2.5	0.0478	4.52
23.0	0.33705	193.2	0.000	0.000	778.0	661.7	0.000	2.5	0.0492	4.60
24.0	0.33626	189.1	0.000	0.000	787.5	655.0	0.000	2.5	0.0507	4.68
25.0	0.33514	185.0	0.000	0.000	796.7	648.6	0.000	2.5	0.0522	4.77

ДОДАТОК 2

Приклад результирующего файла **rzgta1ck.dat** программы "GTAICK"

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПОДПРОГРАММА GTAICK
РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ГТУ ПРОСТОГО ЦИКЛА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЕТУ
Студент гр. 551 Шевченко О.О.

01.ПРИЗНАК ЦИКЛА	1
02.ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА ПЕРЕД ТВД ГТД,К	1300.0
03.ТЕМПЕРАТУРА НАРУЖНОГО ВОЗДУХА,К	298.0
04.ДОПУСТИМАЯ ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА ЛОПАТОК,К	1060.0
05.КПД ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА	0.9000
05.КПД ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ	0.9000
06.МЕХАНИЧЕСКИЙ КПД ГТА	0.9750
07.КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ КС	0.9900
08.НАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ QK	6.00
09.КОНЕЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ QK	25.00
10.ШАГ СПУСКА ПО QK	1.00
12.КВПД ДЛЯ ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА	0.9800
13.КВПД ДЛЯ ПЕРЕХОДНИКОВ КОМПРЕССОРОВ	0.9950
14.КВПД ДЛЯ ОСНОВНОЙ КС	0.9400
15.КВПД ДЛЯ ОПОРНЫХ ВЕНЦОВ ТУРБИН	0.9950
16.КВПД ДЛЯ ГАЗООТВОДНОГО УСТРОЙСТВА	0.9800
17.УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА	0.0240
18.КВПД ДЛЯ РЕГЕНЕРАТОРА	1.0000
19.СТЕПЕНЬ РЕГЕНЕРАЦИИ	0.0000
20.КВПД ДЛЯ УТИЛИЗАЦИОННОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА	1.0000
21.ВНУТРЕННИЙ КПД УТИЛИЗАЦИОННОЙ ПТ	0.0000
22.НЕДООХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА В ПВО,ГРАД.	0.00
23.КВПД ДЛЯ ПВО	1.0000
24.НЕДОГРЕВ ГАЗА В КСПП,ГРАД.	0.00
25.КВПД ДЛЯ КСПП	1.0000

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЦИКЛА КГТА

QKN	UE	NEUD KBT/(KG/C)	T4 К	TRP К	T6 К	OGPP	OGOX	AL
10.0	0.4144	484.0	831.6	650.0	415.0	0.2146	0.0294	2.84
11.0	0.4235	475.0	813.8	650.0	419.6	0.1975	0.0272	2.96
12.0	0.4306	465.7	798.1	650.0	424.1	0.1837	0.0240	3.07
13.0	0.4365	454.8	783.1	650.0	428.6	0.1696	0.0232	3.19
14.0	0.4412	443.6	769.4	650.0	433.0	0.1567	0.0226	3.30
15.0	0.4450	432.4	756.7	650.0	437.4	0.1452	0.0221	3.42
16.0	0.4479	421.1	744.9	650.0	441.6	0.1346	0.0217	3.53
17.0	0.4502	409.9	733.9	650.0	445.8	0.1250	0.0212	3.65
18.0	0.4517	398.9	723.5	650.0	450.0	0.1162	0.0208	3.76
19.0	0.4527	387.9	713.8	650.0	454.0	0.1080	0.0204	3.87
20.0	0.4537	377.2	704.6	650.0	458.0	0.1004	0.0200	3.99
21.0	0.4534	367.2	696.0	650.0	462.0	0.0938	0.0191	4.10
22.0	0.4528	357.0	687.8	647.8	465.8	0.0873	0.0189	4.21
23.0	0.4519	347.7	680.0	640.0	469.3	0.0818	0.0187	4.31
24.0	0.4505	338.4	672.7	632.7	472.8	0.0765	0.0185	4.42
25.0	0.4489	329.2	665.6	625.6	476.3	0.0714	0.0183	4.53

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ващиленко Н.В.* Тепловые расчеты газотурбинных и газопаротурбинных агрегатов с использованием ЕС ЭВМ: Учебное пособие. – Николаев: НКИ, 1987. – 46 с.
2. *Ващиленко Н.В.* Математическое моделирование и исследование теплоутилизирующих паротурбинных контуров // Судовые энергетические установки : Сб. науч. тр. – Николаев: НКИ, 1986. – Вып. 239. – С. 3–7.
3. *Ващиленко Н.В., Генбом В.А.* К вопросу о выборе параметров судовой газопаротурбинной установки с промежуточным подогревом газа // Сб. науч. тр. – Николаев: НКИ, 1978. – Вып. 138. – С.10–15.
4. *Дикий Н.А.* Судовые газопаротурбинные установки. – Л.: Судостроение, 1978. – 261 с.
5. *Локай В.И., Максимова М.И., Струнkin В.А.* Газовые турбины двигателей летательных аппаратов: Теория, конструкция и расчет: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1979. – 447 с.
6. *Манушин Э.А.* Системы охлаждения турбин высокотемпературных газотурбинных двигателей // Итоги науки и техники. Сер. Турбостроение. – М.: ВИНТИ, 1980. – Т. 2 – 279 с.
7. *Сорока Я.Х.* Теория и проектирование судовых газотурбинных двигателей: Учебное пособие. – Л.: Судостроение, 1982. – 112 с.

ЗМІСТ

Основні умовні позначки	3
Індекси	3
Прийняті скорочення	4
1. Математичне моделювання процесів термодинамічних циклів	
ГТА	5
1.1. Постановка задачі вибору оптимальних термодинамічних параметрів циклів суднових і енергетичних ГТА	5
1.2. Основні положення і принципи розробки математичних моделей газотурбінних циклів. Модель циклу ГТА простої схеми ..	7
1.3. Особливості математичних моделей циклів ГТА з регенерацією тепла вихідних газів ГТД	12
1.4. Особливості математичних моделей циклів ГТА з проміжним охолодженням повітря	14
1.5. Особливості математичних моделей циклів ГТА з проміжним підігрівом газу	18
1.6. Математичні моделі циклів комбінованих ГТА з ТУК	21
1.7. Математична модель циклу контактного ГТА з ТУК	23
2. Алгоритми і програми оптимізації циклів суднових і енергетичних ГТА	26
2.1. Алгоритм і програма "GTA1CC" оптимізації параметрів циклів ГТА	26
2.2. Підготовка початкових даних і порядок роботи з програмою "GTA1CC" на ПК IBM PC	31
2.3. Алгоритм і програма "GTA1CK" оптимізації параметрів циклу контактного ГТА з ТУК	33
2.4. Підготовка початкових даних і порядок роботи з програмою "GTA1CK" на ПК IBM PC	36
Додаток 1	38
Додаток 2	39
Список літератури	40

ВАЩИЛЕНКО Микола Віталійович

**ОПТИМІЗАЦІЙНІ РОЗРАХУНКИ
ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ЦИКЛІВ СУДНОВИХ І
ЕНЕРГЕТИЧНИХ ГТА В ЗАДАЧАХ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ**

Навчальний посібник

Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Редактор І.Ю. Цицюра
Комп'ютерна правка Ю.В. Зайцева
Комп'ютерна верстка Н.В. Чудновцева
Коректор Н.О. Шайкіна

Підписано до друку 07.04.03. Формат 60×84/16. Папір офсетний.

Ум. друк. арк. 2,3. Обл.-вид. арк. 2,5. Тираж 215 прим.

Вид. № 37. Зам. № 364. Ціна договірна.



ВИДАВНИЦТВО УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО МОРСЬКОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ



Шановні панове!

Запрошуємо Вас ознайомитись з можливостями книжкового видавництва, висококваліфіковані спеціалісти якого забезпечать оперативне та якісне виконання замовлення будь-якого рівня складності.

Наш головний принцип – задовольнити потреби замовника в повному комплексі поліграфічних послуг, починаючи з розробки та підготовки оригіналу-макета, що виконується на базі IBM PC, і закінчуючи друком на офсетних машинах.

Крім цього, ми маємо повний комплекс післядрукарського обладнання, що дає можливість виконувати:

- ✓ аркушепідбір;
- ✓ брошурування на скобу, клей;
- ✓ порізку на гільйотинах;
- ✓ ламінування.

Видавництво також оснащено сучасним цифровим дублюкатором фірми "Duplo" формату А3, що дає можливість тиражувати зі швидкістю до 130 копій за хвилину.

Для постійних клієнтів – гнучка система знижок.

Отже, якщо вам потрібно надрукувати **підручники, книги, брошури, журнали, каталоги, рекламні листівки, прайс-листи, бланки, візитні картки**, – ми до Ваших послуг.

© Український державний морський технічний університет

✉ Україна, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5,

видавництво УДМТУ

☎ 8(0512) 37-33-42; 39-81-46, 39-73-39, fax 8(0512) 39-73-26;

E-mail: publishing@usmtu.edu.ua



ДЛЯ НОТАТОК