

**Методичні вказівки
до виконання контрольних робіт
з дисципліни «Енергетичні установки»
для студентів спеціальності
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» заочної форми навчання**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки
до виконання контрольних робіт
з дисципліни «Енергетичні установки»
для студентів спеціальності
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» заочної форми навчання**

Вінниця
ВНТУ
2017

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 17.11.2016 р.)

Рецензенти :

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

О. Б. Мокін, доктор технічних наук, професор

Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з дисципліни «Енергетичні установки» для студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» заочної форми навчання / Уклад. О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 46 с.

В методичних вказівках подано теоретичні основи та наведено приклади розв'язання задач з дисципліни із розрахунками циклів енергетичних установок. Методичні вказівки призначені для виконання контрольних робіт студентами заочної форми навчання та містять практичні завдання до контрольних робіт з індивідуальними числовими даними.

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 ЦИКЛИ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК (ГТУ). ЦИКЛ БРАЙТОНА	5
1.1 Цикл Брайтона	6
1.2 Цикл ГТУ з регенерацією	10
2 ЦИКЛИ ПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВОК (ПТУ) . ЦИКЛ РЕНКІНА	15
2.1 Цикл найпростішої паротурбінної установки	15
2.2 Регенеративний цикл ПТУ	19
3 ЦИКЛИ ПАРОГАЗОВИХ УСТАНОВОК	26
4 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ.....	30
Рекомендована література.....	36
Додатки.....	37

ПЕРЕДМОВА

Однією із головних задач спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» є задача раціонального використання енергоресурсів в енергетичних установках, в основу роботи яких покладені певні термодинамічні цикли. Виходячи з цього, витікає необхідність застосування теоретичних знань, отриманих при вивченні дисципліни «Енергетичні установки», для вирішення конкретних інженерних задач в галузі енергетики за допомогою методів термодинамічного аналізу.

Поставлена мета може бути досягнута тільки при усвідомленому виконанні завдань студентами. Для виконання контрольних робіт студентам необхідно розуміти фізичну суть термодинамічних процесів, які складають задану схему енергетичної установки, володіти методами розрахунків процесів і циклів з використанням термодинамічних діаграм і таблиць стану, систематично працювати з рекомендованою літературою.

В «Методичних вказівках...» широко подано теоретичний матеріал з прикладами розрахунків термодинамічних циклів енергетичних установок. «Методичні вказівки...» передбачають варіантні завдання для виконання контрольних робіт для студентів заочної форми навчання за основними темами. «Методичні вказівки...» містять необхідні додатки, що полегшує їх використання для вирішення практичних завдань. Це дозволить студентам працювати самостійно і творчо.

Автор вдячна рецензентам за слушні пропозиції та поради в процесі підготовки даних «Методичних вказівок...» до друку.

1 ЦИКЛИ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК (ГТУ). ЦИКЛ БРАЙТОНА

Газотурбінна установка (ГТУ) відрізняється від інших газосилових установок високою питомою потужністю, компактністю, швидкохідністю, простотою конструкції. Газова турбіна придатна для різноманітних силових установок на електростанціях, транспорті та в інших галузях промисловості. Газова турбіна як тепловий двигун являє тільки складову частину газотурбінної установки.

Розрізняють ГТУ закритого і відкритого типу. Схема ГТУ відкритого типу наведена на рис. 1.1.

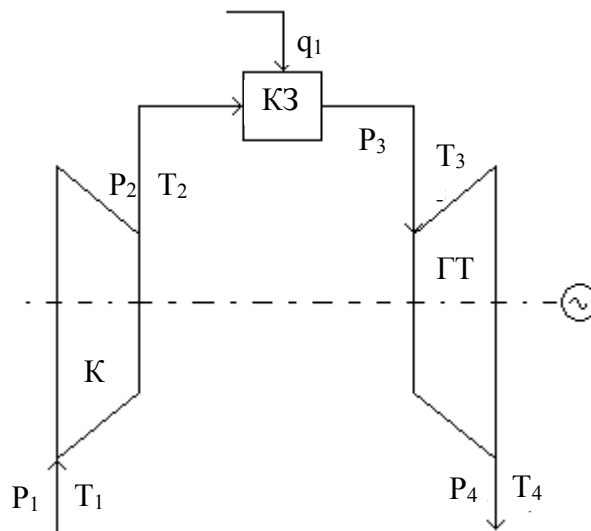


Рисунок 1.1 – Схема ГТУ відкритого типу

В ГТУ відкритого типу (рис. 1.1) компресор К стискає повітря з навколишнього середовища, яке з параметрами P_2 , T_2 надходить в камеру згорання (КЗ). У камеру згорання також під тиском надходить рідке або газоподібне паливо. Продукти згорання палива (димові гази) з температурою T_3 надходять в газову турбіну, звідки після здійснення роботи виштовхуються в навколишнє середовище.

Перевагою ГТУ відкритого типу в порівнянні із ГТУ закритого циклу є менша вартість внаслідок меншої кількості допоміжного устаткування. Недоліком її є те, що продукти згорання забруднюють проточну частину турбіни. Крім того, в закритій ГТУ круговий процес може здійснюватись при більш високих тисках, що збільшує її питому потужність, наявність

зовнішнього газонагрівника в ГТУ закритого типу дозволяє також використовувати тверді види палива. На практиці, однак, найбільш поширені ГТУ відкритого типу, які працюють за технічно найбільш простими схемами.

1.1 Цикл Брайтона

Ідеалізований цикл ГТУ з ізобарним підведенням та відведенням теплоти називається **циклом Брайтона**.

Тиск повітря за компресором, МПа

$$P_2 = P_1 \cdot \lambda_k, \quad (1.1)$$

де P_1 – тиск повітря перед компресором, МПа;

λ_k – міра підвищення тиску в компресорі.

Тиск газів перед турбіною, МПа

$$P_3 = P_2 \cdot \varepsilon, \quad (1.2)$$

де ε – коефіцієнт повного стиснення.

Міра зменшення тиску в турбіні

$$\lambda_T = \frac{P_3}{P_4}, \quad (1.3)$$

де P_4 – тиск газів за турбіною, МПа.

Температура повітря за компресором, К

$$T_2 = T_1 \cdot \left[1 + \frac{(\lambda_k^{0,285} - 1)}{\eta_k} \right], \quad (1.4)$$

де T_1 – температура повітря перед компресором, К;

η_k – ККД компресора.

Температура газів за турбіною, К

$$T_4 = T_3 \cdot \left[1 - \left(1 - \lambda_T^{-0,265} \right) \cdot \eta_k \right], \quad (1.5)$$

де T_3 – температура в камері згорання, К.

Питома робота газів у турбіні, кДж/кг

$$l_T = \bar{C}_{pg} \cdot (T_3 - T_4), \quad (1.6)$$

де \bar{C}_{pg} – середня теплоємність газів, кДж/(кг·К).

Питома робота стискання в компресорі, кДж/кг

$$l_k = C_{pp} \cdot (T_2 - T_1), \quad (1.7)$$

де C_{pp} – середня теплоємність повітря, кДж/(кг·К).

Питома робота циклу ГТУ, кДж/кг

$$l_{\text{ц}} = (l_T - l_k) \cdot \eta_{\text{ем}}, \quad (1.8)$$

де $\eta_{\text{ем}}$ – електромеханічний ККД.

Питома теплота, що підведена в камеру згорання ГТУ, кДж/кг

$$q_{\text{кз}} = \left(\bar{C}_{pg} \cdot t_3 - C_{pp} \cdot t_2 \right) / \eta_{\text{кз}}, \quad (1.9)$$

де $\eta_{\text{кз}}$ – ККД камери згорання.

Коефіцієнт корисної дії ГТУ

$$\eta_{\text{ГТУ}} = \frac{l_{\text{ц}}}{q_{\text{кз}}}. \quad (1.10)$$

Питома витрата умовного палива ГТУ, кг/(кВт·год)

$$b_y = \frac{0,123}{\eta_{\text{ГТУ}}}. \quad (1.11)$$

Загальна витрата умовного палива, кг/с

$$V_y^{\text{ГТУ}} = \frac{b_y \cdot N_e}{3,6}, \quad (1.12)$$

де N_e – електрична потужність турбіни, МВт.

Витрата робочого палива ГТУ, м³/с

$$V_p^{\text{ГТУ}} = V_y^{\text{ГТУ}} \cdot \frac{Q_{\text{ну}}^p}{Q_{\text{н}}^p}, \quad (1.13)$$

де $Q_{\text{ну}}^p$ – нижча теплота згорання умовного палива, МДж/кг;

$Q_{\text{н}}^p$ – нижча теплота згорання робочого палива, МДж/м³.

Приклад 1.1

Виконати розрахунки циклу ГТУ, визначити термічний ККД та витрату умовного палива на ГТУ. Газотурбінна установка працює за циклом Брайтона. Потужність електрогенератора ГТУ становить 10 МВт. Температура повітря перед компресором $T_1 = 278$ К. Міра підвищення тиску в компресорі $\lambda_k = 5,4$. Температура газів перед турбіною $T_3 = 1203$ К. Теплоємність повітря $C_{\text{рп}} = 1,05$ кДж/(кг·К), теплоємність газів: $C_{\text{рг}} = 1,17$ кДж/(кг·К). Схема ГТУ наведена на рис. 1.1.

Розв'язання

Показник степеня

$$m = \frac{k-1}{k} = \frac{1,4-1}{1,4} = 0,286;$$

де k – показник адіабати; для повітря $k = 1,4$.

Температура повітря за компресором

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda_k^m = 278 \cdot 5,4^{0,286} = 450 \text{ К.}$$

Температура газів за турбіною

$$T_4 = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_2} = \frac{278 \cdot 1203}{450} = 737 \text{ К.}$$

Ізобарна теплоємність повітря $C_{рп} = 1,05 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$.

Ізобарна теплоємність газів $C_{рг} = 1,17 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$.

Питома робота компресора

$$l_k = C_{рп} \cdot (T_2 - T_1) = 1,05 \cdot (450 - 278) = 180,6 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота газів в турбіні

$$l_T = C_{рг} \cdot (T_3 - T_4) = 1,17 \cdot (1203 - 743) = 538,2 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота циклу ГТУ

$$l_{ц} = l_T - l_k = 538,2 - 180,6 = 357,6 \text{ кДж/кг.}$$

Питома теплота, підведена в камеру згорання,

$$q_{кз} = q_1 = C_{рг} \cdot T_3 - C_{рп} \cdot T_2 = 1,17 \cdot 1203 - 1,05 \cdot 450 = 935,01 \text{ кДж/кг.}$$

Термічний ККД циклу ГТУ

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_{кз}} = \frac{357,6}{935,01} = 0,382.$$

Питома витрата умовного палива на ГТУ

$$b_y^{гту} = \frac{0,123}{\eta_t} = \frac{0,123}{0,382} = 0,322 \text{ кг у. п./}(кВт\cdot\text{год.}).$$

Загальна витрата умовного палива на ГТУ

$$B_y^{\text{ГТУ}} = \frac{b_y^{\text{ГТУ}} \cdot N_e^{\text{ГТУ}}}{3,6} = \frac{0,322 \cdot 10}{3,6} = 0,894 \text{ кг у. п./с.}$$

Витрата робочого тіла в ГТУ

$$G_r = \frac{N_e^{\text{ГТУ}}}{l_{\text{ц}}} = \frac{10 \cdot 10^3}{357,6} = 27,964 \text{ кг/с.}$$

Потужність компресора

$$N_k = G_r \cdot l_k \cdot 10^{-3} = 27,964 \cdot 180,6 \cdot 10^{-3} = 5,05 \text{ МВт.}$$

Потужність газової турбіни

$$N_{\text{ГТ}} = N_e^{\text{ГТУ}} + N_k = 10 + 5,05 = 15,05 \text{ МВт.}$$

Теплота, підведена в камеру згорання,

$$Q_{\text{кз}} = G_r \cdot q_{\text{кз}} \cdot 10^{-3} = 27,964 \cdot 935,01 \cdot 10^{-3} = 26,147 \text{ МВт.}$$

Коефіцієнт використання потужності

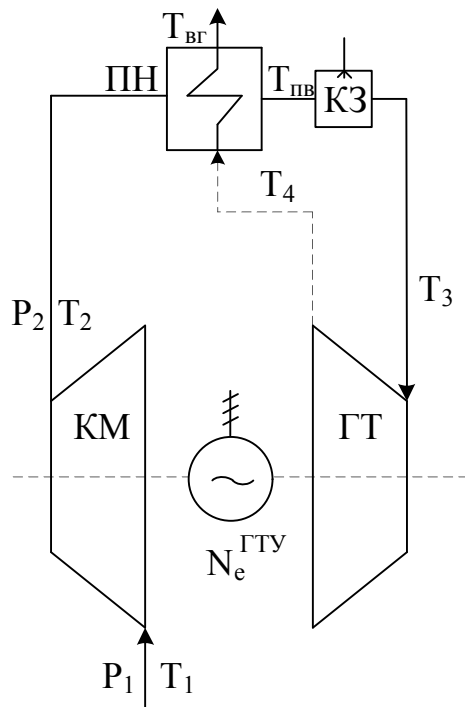
$$\varphi = \frac{N_e^{\text{ГТУ}}}{N_{\text{ГТ}}} = \frac{10}{15,05} = 0,664.$$

1.2 Цикл ГТУ з регенерацією

Істотним недоліком циклу Брайтона є те, що в ньому не використовується достатньо висока енергія відпрацьованих газів. Покращити газотурбінний процес можна за рахунок використання цієї енергії в схемі ГТУ. Оскільки температура відхідних газів T_4 вища за температуру повітря після компресора T_2 , то є можливість збільшити останню шляхом підігрівання повітря відпрацьованими газами. Процес попереднього нагрівання повітря

перед камерою згорання за рахунок теплоти відхідних газів називають **регенерацією**, а цикл ГТУ, в якому здійснюється регенерація, – **регенеративним**.

Схема ГТУ з регенерацією наведена на рис. 1.2.



ГТ – газова турбіна; КЗ – камера згорання; КМ – компресор;
ПН – повітрянагрівник

Рисунок 1.2 – Схема газотурбінної установки з регенерацією

Ця схема ГТУ (рис. 1.2) відрізняється від попередньої схеми наявністю повітрянагрівника (ПН), в якому гази після турбіни нагрівають стиснене повітря від температури T_2 до температури $T_{пв}$. При цьому температура димових газів зменшується від T_4 до $T_{вг}$. В реальному процесі в повітрянагрівнику повітря не догрівається до температури T_4 на величину $\theta = T_4 - T_{пв}$. Тому ефективність повітрянагрівника характеризується співвідношенням

$$\sigma = \frac{T_{пв} - T_2}{T_4 - T_2} = 1 - \frac{\theta}{T_4 - T_2}, \quad (1.14)$$

в якому коефіцієнт $\sigma < 1$ називається **мірою регенерації**.

В такій ГТУ надходження більш підігрітого повітря в камеру згорання, за умови $T_3 = \text{const}$, дає змогу зменшити величину підведеної в камеру згорання теплоти q_1 , а, отже, і зменшити витрату палива на ГТУ.

Приклад 1.2

Виконати розрахунки циклу ГТУ, визначити термічний ККД та витрату умовного палива на ГТУ. Газотурбінна установка працює за циклом Брайтона з регенерацією теплоти. Потужність електрогенератора ГТУ становить 6 МВт. Температура повітря перед компресором $T_1 = 293$ К. Температура газів перед турбіною становить $T_3 = 1350$ К. Міра підвищення тиску в компресорі $\lambda_k = 6,8$. Теплоємність повітря $C_{pp} = 1,05$ кДж/(кг·К), теплоємність газів: $C_{pg} = 1,17$ кДж/(кг·К). Значення міри регенерації $\sigma = 0,4$. Схема ГТУ з регенерацією наведена на рис. 1.2.

Розв'язання

Показник ступеня

$$m = \frac{k-1}{k} = \frac{1,4-1}{1,4} = 0,286;$$

де k – показник адіабати; для повітря $k = 1,4$.

Температура повітря за компресором

$$T_2 = T_1 \cdot \lambda_k^m = 293 \cdot 6,8^{0,286} = 511 \text{ К.}$$

Температура газів за турбіною

$$T_4 = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_2} = \frac{293 \cdot 1350}{511} = 599 \text{ К.}$$

Питома робота компресора

$$l_k = C_{pp} \cdot (T_2 - T_1) = 1,05 \cdot (511 - 293) = 228,9 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота газів в турбіні

$$l_T = C_{pg} \cdot (T_3 - T_4) = 1,17 \cdot (1350 - 774) = 673,92 \text{ кДж/кг.}$$

Питома робота циклу ГТУ

$$l_{ц} = l_T - l_K = 673,92 - 228,9 = 445,02 \text{ кДж/кг.}$$

Підставимо значення міри регенерації у формулу

$$\sigma = 0,4 = \frac{T_{п} - T_2}{T_4 - T_{вг}},$$

де $T_{п}$ – температура повітря після регенератора перед камерою згорання, яка визначається так:

$$T_{п} = \sigma \cdot (T_4 - T_{вг}) + T_2 = 0,4 \cdot (774 - 423) + 511 = 651,4 \text{ К.}$$

Питома теплота, підведена в камеру згорання,

$$q_{кз} = q_1 = C_{pg} \cdot T_3 - C_{pp} \cdot T_{п} = 1,17 \cdot 1350 - 1,05 \cdot 651,4 = 893,53 \text{ кДж/кг.}$$

Термічний ККД циклу ГТУ

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_{кз}} = \frac{445,02}{893,53} = 0,498.$$

Питома витрата умовного палива на ГТУ

$$b_y^{гту} = \frac{0,123}{\eta_t} = \frac{0,123}{0,498} = 0,247 \text{ кг у. п./кВт·год.}$$

Загальна витрата умовного палива на ГТУ

$$B_y^{гту} = \frac{b_y^{гту} \cdot N_e^{гту}}{3,6} = \frac{0,247 \cdot 6}{3,6} = 0,412 \text{ кг у. п. /с.}$$

Витрата робочого тіла в ГТУ

$$G_{\Gamma} = \frac{N_e^{\Gamma T Y}}{l_{\Gamma}} = \frac{6 \cdot 10^3}{445,02} = 13,48 \text{ кг/с.}$$

Потужність компресора

$$N_{\kappa} = G_{\Gamma} \cdot l_{\kappa} \cdot 10^{-3} = 13,48 \cdot 228,9 \cdot 10^{-3} = 3,086 \text{ МВт.}$$

Потужність газової турбіни

$$N_{\Gamma T} = N_e^{\Gamma T Y} + N_{\kappa} = 6 + 3,086 = 9,086 \text{ МВт.}$$

Теплота, підведена в камеру згорання,

$$Q_{\kappa 3} = G_{\Gamma} \cdot q_{\kappa 3} \cdot 10^{-3} = 13,48 \cdot 893,53 \cdot 10^{-3} = 12,045 \text{ МВт.}$$

Коефіцієнт використання потужності

$$\varphi = \frac{N_e^{\Gamma T Y}}{N_{\Gamma T}} = \frac{6}{9,086} = 0,66.$$

2 ЦИКЛИ ПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВОК (ПТУ). ЦИКЛ РЕНКІНА

2.1 Цикл найпростішої паротурбінної установки

Паротурбінні установки (ПТУ) призначені для перетворення хімічної або атомної енергії у корисну механічну роботу. Робочим тілом в ПТУ є водяна пара, яка здійснює круговий процес.

Схема найпростішої ПТУ показана на рис. 2.1.

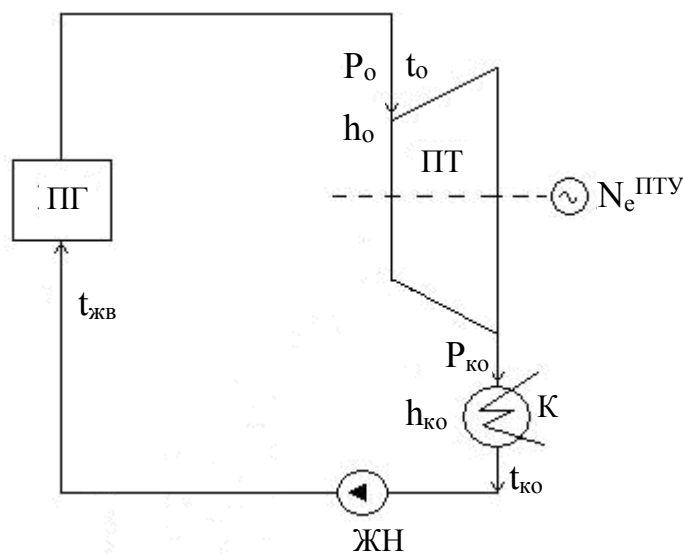


Рисунок 2.1 – Схема найпростішої ПТУ

Живильний насос (ЖН) адіабатно стискає живильну воду (конденсат) до тиску P_0 . Живильна вода з температурою $t_{жв}$ надходить в парогенератор (ПГ). В парогенераторі, за рахунок теплоти, яка вивільняється при згоранні палива, генерується водяна пара з параметрами P_0 , t_0 , h_0 . Ця пара надходить в парову турбіну (ПТ), де адіабатно розширюється до кінцевих параметрів $P_{ко}$, $t_{ко}$, $h_{ко}$, виконуючи технічну роботу.

Відпрацьована в турбіні пара надходить в конденсатор (К), внутрішня поверхня якого охолоджується циркуляційною водою. На зовнішній поверхні труб конденсатора здійснюється повна конденсація пари, внаслідок чого утворюється глибокий вакуум, тобто кінцевий тиск $P_{ко}$ стає набагато менший за атмосферний. Зниження кінцевих параметрів пари за рахунок конденсації значно збільшує корисну роботу пари в турбіні та підвищує

економічність циклу. Конденсат пари насосом (Н) знову повертається в парогенератор. Такий ідеальний цикл ПТУ, що складається з двох ізобар та двох адіабат, називається **циклом Ренкіна**.

2.1.1 Теоретичні цикли

Якщо знехтувати початковою швидкістю пари перед турбіною, то технічна робота визначається

$$l_{\text{то}} = h_o - h_{\text{ко}} = H_o, \quad (2.1)$$

де H_o – адіабатний теплоперепад в турбіні.

Оскільки вода практично нестислива, то процес стискання в насосі ізохорно-адіабатний.

Отже, робота насоса становить

$$l_{\text{но}} = \int_1^2 -v dP = v(P_o - P_k) = h_2 - h_1 = H_{\text{но}}, \quad (2.2)$$

де $H_{\text{но}}$ – адіабатний теплоперепад в насосі.

Корисна робота циклу

$$l_{\text{цо}} = l_{\text{то}} - l_{\text{но}} = H_o - H_{\text{но}}. \quad (2.3)$$

Термічний ККД теоретичного циклу

$$\begin{aligned} \eta_{\text{то}} &= \frac{l_{\text{цо}}}{q_o} = \frac{(H_o - H_{\text{но}})}{(h_o - h_{\text{жв}})} = \\ &= \frac{(H_o - H_{\text{но}})}{(h_o - 4,19 \cdot h_{\text{жв}})}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де $h_{\text{жв}}$ – ентальпія живильної води.

При невеликих потужностях турбін і тисках P_o роботою насоса і підвищенням температури в насосі можна знехтувати.

Тоді термічний ККД можна обчислити за наближеною формулою

$$\eta_{to} \approx \frac{H_o}{(h_o - 4,19 \cdot t_k)} \cdot \quad (2.5)$$

Для кругових процесів справедливий такий вираз термічного ККД

$$\begin{aligned} \eta_{to} &= 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_k}{q_o} = \\ &= 1 - \left[\frac{(h_k - 4,19 \cdot t_k)}{(h_o - 4,19 \cdot t_k)} \right], \end{aligned} \quad (2.6)$$

де $q_2 = q_k$ – питомі теплові втрати в конденсаторі;

$q_1 = q_o$ – підведена теплота в циклі.

2.1.2 Реальні цикли

В реальних циклах ПТУ процеси розширення пари і стискання води адиабатно необоротні.

Роботи турбіни і насоса в реальних циклах визначаються, відповідно,

$$l_T = l_{to} \cdot \eta_{oi}^T = H_o \cdot \eta_{oi}^T = H_p, \quad (2.7)$$

$$l_H = \frac{l_{no}}{\eta_{oi}^H} = \frac{H_{no}}{\eta_{oi}^H} = H_H, \quad (2.8)$$

де η_{oi}^T , η_{oi}^H – відносні внутрішні ККД турбіни і насоса, відповідно;

H_p , H_H – робочі теплоперепади в турбіні і насосі, відповідно.

Термічний ККД реального циклу ПТУ

$$\eta_t = \frac{(H_p - H_H)}{q_o} = \frac{(H_p - H_H)}{(h_o - 4,19 \cdot t_{жв})} \cdot \quad (2.9)$$

В турбіні 1 кг пари виконує корисну роботу H_p . Отже, питома витрата пари на виробництво 1 кВт·год (3600 кДж) енергії становить, $\frac{\text{кг}}{(\text{кВт} \cdot \text{год})}$

$$d_o = \frac{3600}{l_{\text{ц}}} = \frac{3600}{(H_p - H_H)}. \quad (2.10)$$

Витрата пари на турбіну, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

$$D_o = \frac{d_o \cdot N_e}{3,6}, \quad (2.11)$$

де N_e – потужність електрогенератора ПТУ, МВт.

Потужність електрогенератора ПТУ, МВт

$$N_e = D_o \cdot l_T \cdot \eta_{\text{ем}} \cdot 10^{-3} = D_o \cdot H_p \cdot \eta_{\text{ем}} \cdot 10^{-3}, \quad (2.12)$$

де $\eta_{\text{ем}}$ – електромеханічний ККД.

Теплова потужність, підведена в парогенераторі паротурбінної установки, МВт

$$Q_{\text{ПГ}} = D_o \cdot q_o \cdot 10^{-3} = D_o \cdot (h_o - C_p \cdot t_{\text{ЖВ}}) \cdot 10^{-3}. \quad (2.13)$$

Втрати теплової потужності в конденсаторі (рівняння теплового балансу конденсатора), МВт

$$\begin{aligned} Q_K &= D_o \cdot q_K \cdot 10^{-3} = D_o \cdot (h_K - C_{p_B} \cdot t_K) \cdot 10^{-3} = \\ &= G_{\text{ОВ}} \cdot C_{p_B} \cdot \Delta t_{\text{ОВ}} \cdot 10^{-3}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

де $G_{\text{ОВ}}$ – масова витрата води в конденсаторі ПТУ;

C_{p_B} – масова ізобарна теплоємність охолодної води в конденсаторі;

$\Delta t_{\text{ОВ}}$ – величина підігрівання охолодної води в конденсаторі.

Питома витрата умовного палива на виробництво 1кВт·год електричної енергії в паротурбінній установці, кг у. п. /(кВт·год), визначається так:

$$b_y = \frac{0,123}{\eta_t}. \quad (2.15)$$

Загальна витрата умовного палива на ПТУ, кг у. п./с

$$B_y = \frac{b_y \cdot N_e}{3,6}. \quad (2.16)$$

2.2 Регенеративний цикл ПТУ

Підвищити ККД циклу ПТУ можна за рахунок збільшення температури живильної води за допомогою регенерації теплоти в циклі. Здійснити регенерацію в циклі Ренкіна можна, якщо конденсат підігрівати паром, яка вже частково відпрацювала в турбіні.

Схема і зображення на $h-s$ діаграмі циклу ПТУ з одним регенеративним відбором пари наведені на рис. 2.2 та 2.3, відповідно.

Із відбору турбіни (точка 1) (рис. 2.3) в регенеративний підігрівник (РП) надходить частка пари α_1 з параметрами P_1, h_1 , яка вже виконала роботу в турбіні $H_{o1} = h_o - h_1$. Ця грійна пара підігріває в РП конденсат від температури t_k до температури $t_{жв}$. Конденсат грійної пари при тиску P_1 і температурі насичення $t_{н1}$ повертається в лінію живильної води.

Інша частка пари $\alpha_k = 1 - \alpha_1$ продовжує розширення в турбіні, виконуючи роботу $H_o = h_o - h_k$, після чого надходить в конденсатор.

Таким чином, теоретична робота пари в турбіні складає

$$\begin{aligned} l_{то}^p &= \alpha_1 \cdot H_{o1} + \alpha_k \cdot H_o = \alpha_1(h_o - h_1) + (1 - \alpha_1) \cdot (h_o - h_k) = \\ &= (h_o - h_k) - \alpha_1 \cdot (h_1 - h_k) = H_o - \alpha_1(h_1 - h_k) = H_o(1 - \alpha_1 \cdot y_1), \end{aligned} \quad (2.17)$$

де $y_1 = (h_1 - h_k) / H_o$ – коефіцієнт недовиконання роботи (потужності).

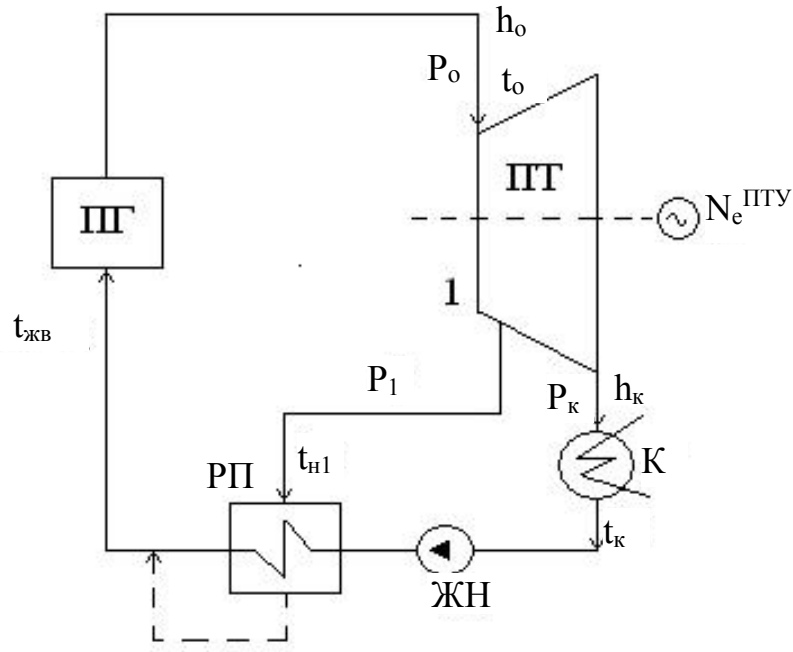


Рисунок 2.2 – Схема ПТУ з одним регенеративним відбором пари

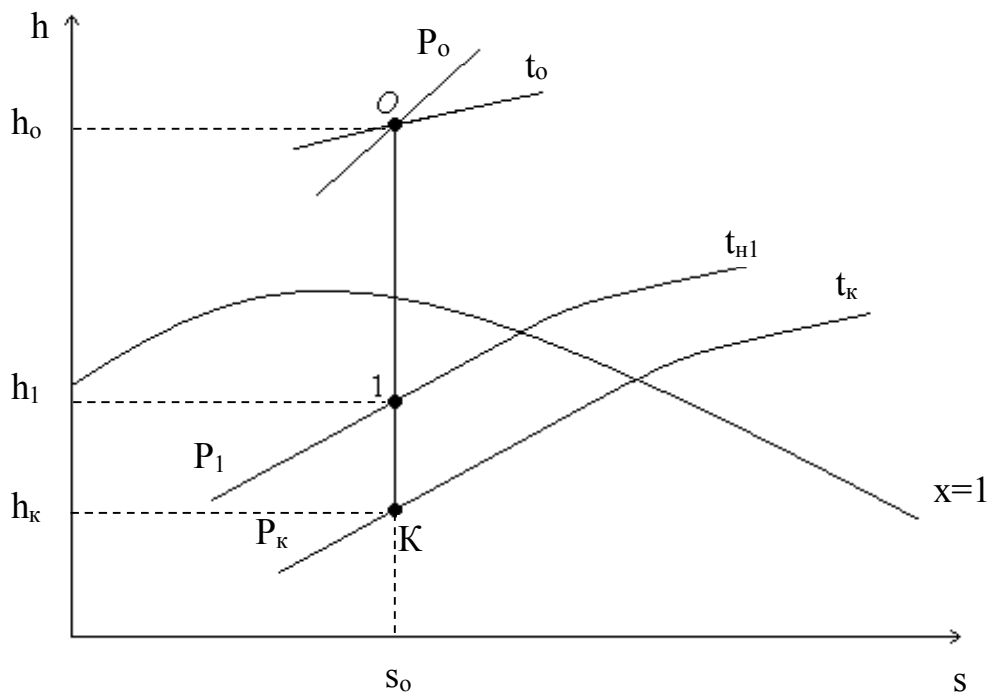


Рисунок 2.3 – Зображення циклу ПТУ з одним регенеративним відбором пари на h-s діаграмі

Підведена питома теплота в регенеративному циклі

$$q_0^p = h_0 - h_{жв} = h_0 - C'_p \cdot t_{жв}. \quad (2.18)$$

Питома втрата теплоти в конденсаторі

$$q_k^p = h_k - C'_p \cdot t_k. \quad (2.19)$$

Термічний ККД циклу ПТУ з регенерацією

$$\eta_{to}^p = \frac{l_{to}^p}{q_0^p} = H_0 \cdot (1 - \alpha_1 \cdot y_1) / (h_0 - C'_p \cdot t_{жв}). \quad (2.20)$$

або

$$\eta_{to}^p = 1 - \frac{\alpha_k \cdot q_k^p}{q_0^p} = 1 - \frac{\alpha_k \cdot (h_k - C'_p \cdot t_k)}{(h_0 - C'_p \cdot t_{жв})}. \quad (2.21)$$

Незважаючи на зменшення роботи пари в турбіні, економічність циклу ПТУ з регенерацією зростає як за рахунок зменшення втрат в конденсаторі, так і за рахунок зменшення теплоти, витраченої на цикл. Крім того, регенерація збільшує середню термодинамічну температуру підведення теплоти в парогенераторі, що зумовлює зменшення необоротних втрат при теплообміні. Підвищення термічного ККД при одноступінчастому регенеративному підігріванні живильної води в циклі складає

$$\Delta \eta_{to} = \eta_{to}^p - \eta_{to} = q_k \left(\frac{1}{q_0} - \frac{\alpha_k}{q_0^p} \right). \quad (2.22)$$

Частку пари з відбору турбіни, що надходить в РП, можна визначити з рівняння теплового балансу підігрівника: $\alpha_1 C'_p t_{h1} + \alpha_1 h_1 + (1 - \alpha_1) C'_p t_k = C'_p t_{жв}$, звідки

$$\alpha_1 = \frac{q_{в1}}{(q_{в1} + q_{п1})}, \quad (2.23)$$

де $q_{в1} = C'_p \cdot (t_{жв} - t_k)$ – питома теплота, яку сприймає вода в регенеративному підігрівнику;

$q_{п1} = h_1 - C'_p \cdot t_{п1}$ – питома теплота, яку віддає пара в регенеративному підігрівнику на підігрівання води.

У випадку одноступінчастого регенеративного підігрівання живильної води в циклі частки пари в конденсаторі та у відборі пов'язані співвідношенням: $\alpha_1 + \alpha_k = 1$.

Витрата пари на конденсатор, кг/с

$$D_k = \alpha_k \cdot D_o = (1 - \alpha_1) \cdot D_o. \quad (2.24)$$

Витрата пари на РП, кг/с

$$D_1 = \alpha_1 \cdot D_o = (1 - \alpha_k) \cdot D_o. \quad (2.25)$$

Втрати теплової потужності в конденсаторі, МВт

$$Q_k = D_k \cdot q_k \cdot 10^{-3} = \alpha_k \cdot D_o \cdot (h_k - C'_p \cdot t_k) \cdot 10^{-3}. \quad (2.26)$$

Потужність електрогенератора ПТУ, МВт

$$N_e = D_o \cdot l_{то}^p \cdot \eta_{oi}^r \cdot \eta_{ем} \cdot 10^{-3}. \quad (2.27)$$

Приклад 2.1

Виконати розрахунки циклу ПТУ, визначити термічний ККД та витрату умовного палива на ПТУ. Паротурбінна установка працює за циклом Ренкіна. Потужність електрогенератора ПТУ становить 25 МВт. Параметри пари перед турбіною: $P_o = 9$ МПа, $t_o = 540$ °С. Паротурбінна установка має один регенеративний підігрівник РП-1, в якому конденсат підігрівається від температури t_k до температури $t_{жв} = 75$ °С паром з відбору турбіни при тиску $P_1 = 1,7$ бар. Тиск пари в конденсаторі $P_k = 0,045$ бар.

Розв'язання

Схема ПТУ наведена на рис. 2.2. Зображення циклу ПТУ на $h-s$ діаграмі наведено на рис. 2.3.

З $h-s$ діаграми водяної пари визначаємо параметри пари у відповідних точках циклу.

Параметри точки О: ентальпія $h_o = 3495 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; ентропія $s_o = 6,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;
питомий об'єм $v_o = 0,04 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

Параметри точки К: ентальпія $h_k = 2060 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; температура $t_k = 27 \text{ }^\circ\text{C}$;
питомий об'єм $v_k = 27 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; міра сухості $x_k = 0,795$.

Параметри точки 1: температура $t_{н1} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$; ентальпія $h_1 = 2550 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;
питомий об'єм $v_1 = 1 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; міра сухості $x_1 = 0,932$.

Питома теплота, яку сприймає вода в регенеративному підігрівнику,

$$q_{в1} = C'_p \cdot (t_{жв} - t_k) = 4,19(75 - 27) = 201,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питома теплота, яку віддає пара в РП,

$$q_{п1} = h_1 - C'_p \cdot t_{н1} = 2550 - 4,19 \cdot 115 = 2068,15 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Частка пари з відбору турбіни, яка надходить в РП,

$$\alpha_1 = \frac{q_{в1}}{(q_{в1} + q_{п1})} = \frac{201,12}{(201,12 + 2068,15)} = 0,089.$$

Частка пари, яка надходить на конденсатор,

$$\alpha_k = 1 - \alpha_1 = 1 - 0,089 = 0,911.$$

Теоретична робота пари в турбіні

$$l_{\text{To}}^p = \alpha_1(h_o - h_1) + \alpha_k \cdot (h_o - h_k) = 0,089(3495 - 2550) + 0,911(3495 - 2060) = 1391,39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Питома теплота, підведена в парогенераторі,

$$q_o^p = h_o - h_{\text{жв}} = h_o - C'_p \cdot t_{\text{жв}} = 3495 - 4,19 \cdot 75 = 3180,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Питомі теплові втрати в конденсаторі

$$q_k^p = h_k - C'_p \cdot t_k = 2060 - 4,19 \cdot 27 = 1946,87 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Термічний ККД циклу ПТУ з регенерацією

$$\eta_{\text{to}}^p = \frac{l_{\text{to}}^p}{q_o^p} = \frac{1391,39}{3180,75} = 0,437.$$

Питома витрата умовного палива на виробництво 1кВт·год енергії

$$b_y = \frac{0,123}{\eta_{\text{to}}^p} = \frac{0,123}{0,437} = 0,281 \text{ кг у. п. / (кВт·год)}$$

Загальна витрата умовного палива на ПТУ

$$B_y^{\text{пту}} = \frac{b_y \cdot N_e^{\text{пту}}}{3,6} = \frac{0,281 \cdot 25}{3,6} = 1,951 \text{ кг у. п./с.}$$

Витрата пари на турбіну

$$D_o = \frac{N_e^{\text{пту}}}{l_{\text{To}}^p} = \frac{25 \cdot 10^3}{1391,39} = 17,968 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Витрата пари на конденсатор

$$D_k = \alpha_k \cdot D_o = 0,911 \cdot 17,968 = 16,369 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Витрата пари на РП

$$D_1 = \alpha_1 \cdot D_o = 0,089 \cdot 17,968 = 1,599 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Загальні втрати теплової потужності в конденсаторі

$$Q_k = D_k \cdot q_k \cdot 10^{-3} = 16,369 \cdot 1946,87 \cdot 10^{-3} = 31,868 \text{ МВт.}$$

Теплова потужність, підведена в парогенераторі ПТУ

$$Q_{\text{пг}} = D_o \cdot q_o \cdot 10^{-3} = 17,968 \cdot 3180,75 \cdot 10^{-3} = 57,152 \text{ МВт.}$$

3 ЦИКЛИ ПАРОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

Підвищити ефективність циклів ПТУ та ГТУ можна за рахунок їх комбінування зі створенням **парогазових установок** (ПГУ). Таке комбінування дозволяє використати теплоту відхідних газів ГТУ в циклі ПТУ і, таким чином, підвищити ефективність паротурбінної установки в складі ПГУ.

Парогазова установка з використанням теплоти відхідних газів після ГТУ для регенеративного підігрівання живильної води в схемі ПТУ показана на рис. 3.1.

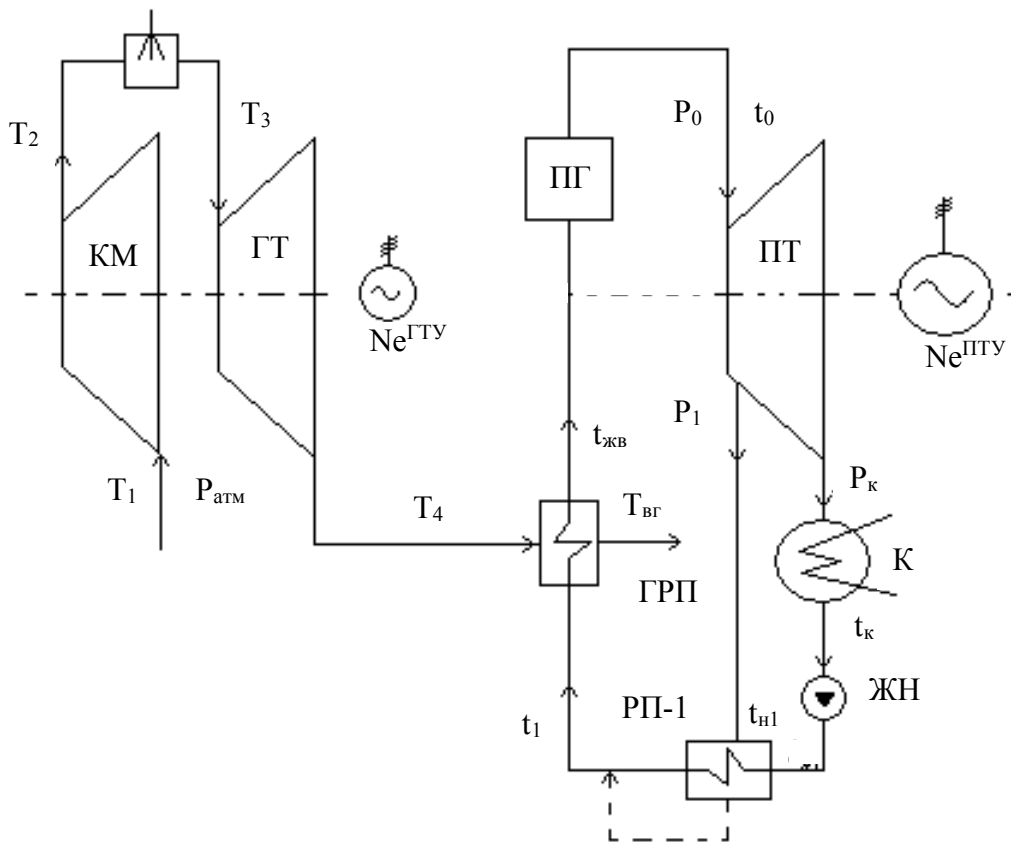


Рисунок 3.1 – Схема ПГУ

В схемі ПГУ (рис. 3.1) газотурбінна установка працює за циклом Брайтона, а паротурбінна – за циклом Ренкіна. Паротурбінна установка має один регенеративний підігрівник РП-1, в якому конденсат підігрівається від температури t_k до температури t_1 парою з відбору турбіни при тиску P_1 . Відпрацьовані в газовій турбіні гази з температурою T_4 надходять у газовий регенеративний підігрівник (ГРП), де охолоджуються до темпера-

тури $T_{вг}$ і підігрівають живильну воду в схемі ПТУ від температури t_1 до температури $t_{жв}$.

Приклад 3.1

Виконати розрахунки ПГУ (див. рис. 3.1), визначити витрату умовного палива та економію умовного палива в комбінованому циклі, якщо відомо:

- витрата умовного палива на ГТУ $V_y^{ГТУ} = 0,894$ кг у. п./с;
- потужність електрогенератора ГТУ $N_e^{ГТУ} = 10$ МВт;
- витрата робочого тіла в ГТУ $G_r = 27,96$ кг/с;
- температура газів після турбіни $T_4 = 743$ К;
- температура відхідних газів після регенератора $T_{вг} = 438$ К;
- витрата пари на парову турбіну $D_o = 17,97$ кг/с;
- температура живильної води після РП-1 $t_1 = 75$ °С;
- ентальпія пари перед турбіною $h_o = 3495$ кДж/кг;
- питома робота в турбіні $l_r = 1391,4$ кДж/кг;
- потужність електрогенератора ПТУ $N_e^{ПТУ} = 25$ МВт;
- потужність, підведена в камеру згорання ГТУ $Q_{кз} = 26,15$ МВт;
- ККД регенеративного теплообмінника $\eta_{то} = 0,98$;
- теплоємність повітря $C_{рп} = 1,05$ кДж/(кг·К),
- теплоємність газів $C_{рг} = 1,17$ кДж/(кг·К).

Розв'язання

Визначимо температуру живильної води $t_{жв}$ з рівняння теплового балансу газового регенеративного підігрівника

$$t_{жв} = \frac{G_r \cdot C_{рг} \cdot (T_4 - T_{вг}) \cdot \eta_{то}}{D_o \cdot C_{рв}} + t_1 =$$

$$= \frac{27,964 \cdot 1,17(743 - 438) \cdot 0,98}{17,968 \cdot 4,19} + 75 = 205 \text{ °С},$$

де $\eta_{то} = 0,98$ – ККД теплообмінника.

Питома теплота, підведена в парогенератор ПТУ у складі ПГУ,

$$(q_o^p)_{\text{ПГУ}} = h_o - C'_p \cdot t_{\text{жв}} = 3495 - 4,19 \cdot 205 = 2636,05 \text{ кДж/кг.}$$

Термічний ККД ПТУ у складі ПГУ

$$(\eta_{\text{то}}^{\text{ПТУ}})_{\text{ПГУ}} = \frac{I_{\text{то}}^p}{(q_o^p)_{\text{ПГУ}}} = \frac{1391,39}{2636,05} = 0,528.$$

Питома витрата умовного палива на ПТУ у складі ПГУ на виробництво 1кВт·год енергії

$$(b_y^{\text{ПТУ}})_{\text{ПГУ}} = \frac{0,123}{(\eta_{\text{то}}^{\text{ПТУ}})_{\text{ПГУ}}} = \frac{0,123}{0,528} = 0,233 \text{ кг у. п. / (кВт·год).}$$

Загальна витрата умовного палива на ПТУ у складі ПГУ

$$(B_y^{\text{ПТУ}})_{\text{ПГУ}} = \frac{(b_y^{\text{ПТУ}})_{\text{ПГУ}} \cdot N_e^{\text{ПТУ}}}{3,6} = \frac{0,233 \cdot 25}{3,6} = 1,618 \text{ кг у. п./с.}$$

Теплова потужність, підведена в парогенератор ПТУ у складі ПГУ,

$$\begin{aligned} (Q_{\text{ПГ}})_{\text{ПГУ}} &= D_o \cdot (q_o^p)_{\text{ПГУ}} \cdot 10^{-3} = \\ &= 17,968 \cdot 2636,05 \cdot 10^{-3} = 47,365 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Термічний ККД ПГУ

$$\eta_{\text{то}}^{\text{ПГУ}} = \frac{N_e^{\text{ПГУ}} + N_e^{\text{ПТУ}}}{Q_{\text{кз}} + (Q_{\text{ПГ}})_{\text{ПГУ}}} = \frac{10 + 25}{26,147 + 47,635} = 0,476.$$

Питома витрата умовного палива на ПГУ

$$b_y^{\text{ПГУ}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{то}}^{\text{ПГУ}}} = \frac{0,123}{0,476} = 0,258 \text{ кг у. п. / (кВт·год).}$$

Загальна витрата умовного палива на ПГУ

$$B_y^{\text{пгу}} = \frac{b_y^{\text{пгу}} \cdot (N_e^{\text{гту}} + N_e^{\text{пгу}})}{3,6} = \frac{0,258 \cdot (10 + 25)}{3,6} = 2,512 \text{ кг у. п./с.}$$

Потужність парогенератора ПТУ, що працює окремо

$$\begin{aligned} Q_{\text{пг}} &= D_o \cdot (h_o - C_{\text{рв}} \cdot t_1) \cdot 10^{-3} = \\ &= 17,978 \cdot (3495 - 4,19 \cdot 75) \cdot 10^{-3} = 57,16 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Термічний ККД ПТУ, що працює окремо

$$\eta_{\text{то}}^{\text{пту}} = \frac{l_{\text{то}}^{\text{р}}}{(h_o - C_{\text{рв}} \cdot t_1)} = \frac{1391,39}{(3495 - 4,19 \cdot 75)} = 0,437.$$

Питома витрата умовного палива на ПТУ, що працює окремо

$$b_y^{\text{пту}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{то}}^{\text{пту}}} = \frac{0,123}{0,437} = 0,281 \text{ кг у. п./кВт} \cdot \text{год.}$$

Загальна витрата умовного палива на ПТУ, що працює окремо

$$B_y^{\text{пту}} = \frac{b_y^{\text{пту}} \cdot N_e^{\text{пту}}}{3,6} = \frac{0,281 \cdot 25}{3,6} = 1,951 \text{ кг у. п./с.}$$

Загальна витрата умовного палива на ПТУ і ГТУ, які працюють окремо,

$$B_y^{\text{окр}} = B_y^{\text{гту}} + B_y^{\text{пту}} = 0,894 + 1,951 = 2,845 \text{ кг у. п./с.}$$

Економія умовного палива при використанні ПГУ

$$\Delta B_y = \frac{B_y^{\text{окр}} - B_y^{\text{пгу}}}{B_y^{\text{окр}}} \cdot 100 = \frac{2,845 - 2,512}{2,845} \cdot 100 = 11,7\%.$$

4 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Номер варіанта в задачах 1 – 7 визначається за шифром, який задає викладач. Теплофізичні властивості води, водяної пари та сухого повітря наведено в додатках А – Б.

Задача 1

Початкові параметри пари в циклі Ренкіна складають: t_o , °С; ρ_o , кг/м³. Визначити кінцеві параметри пари, теплоту пароутворення в кінцевій точці, витрату умовного палива і охолодної води, якщо величина її підігрівання становить Δt , °С; потужність електрогенератора N_e , а витрата пари D_o .

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань до задачі 1

Остання цифра шифру	t_o , °С	ρ_o , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Δt , °С	Передостання цифра шифру	N_e , МВт	D_o , $\frac{\text{т}}{\text{год}}$
0	450	10	15	0	100	360
1	440	8	20	1	120	380
2	430	12	25	2	150	540
3	445	11	22	3	170	700
4	455	9	24	4	200	720
5	435	12	17	5	110	370
6	410	11	16	6	140	540
7	420	10	18	7	130	430
8	415	8	23	8	160	550
9	425	9	19	9	190	720

Задача 2

Температура пари в конденсаторі турбіни становить t_k , питома втрата теплоти складає q_k , кВт·год. Питома витрата умовного палива в циклі Ренкіна з потужністю електрогенератора N_e складає b_y , кг/кВт·год. Визначити параметри пари перед турбіною, витрати умовного палива і охолодної води в конденсаторі, якщо величина її підігрівання складає Δt , °С.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Варіанти завдань до задачі 2

Остання цифра шифру	t_k , °C	Q_k , кВт·год	N_e , МВт	Передостання цифра шифру	b_y , кг / кВт·год	Δt , °C
0	30	0,55	120	0	0,35	15
1	40	0,56	100	1	0,36	20
2	50	0,57	150	2	0,37	25
3	33	0,58	170	3	0,38	22
4	35	0,59	200	4	0,355	24
5	37	0,6	110	5	0,365	17
6	45	0,556	140	6	0,375	16
7	30	0,564	130	7	0,344	18
8	33	0,577	160	8	0,364	23
9	43	0,585	190	9	0,366	19

Задача 3

Визначити термічний ККД ГТУ, потужність компресора і електрогенератора, витрату палива з теплою згорання Q_n^p , якщо відомо: витрата повітря V , м³/с; внутрішній ККД компресора і турбіни – 0,87 і 0,89, відповідно; ККД камери згорання 0,93; механічний ККД 0,96; ККД електрогенератора 0,98. Параметри робочого тіла в точках циклу: P_1 , бар; T_1 , К; v_2 , м³/кг; t_3 , °C; міра регенерації дорівнює σ ; $C_p = 1$ кДж/(кг·К).

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Варіанти завдань до задачі 3

Остання цифра шифру	Q_n^p , МДж / кг	V , м ³ / с	t_3 , °C	Передостання цифра шифру	P_1 , бар	T_1 , К	v_2 , м ³ /кг	σ
0	37	1300	975	0	1,017	300	0,2	0,55
1	36	1500	1000	1	1,04	273	0,15	0,35
2	32	1700	1030	2	1,02	283	0,16	0,45
3	34	1100	1050	3	1,03	293	0,17	0,55
4	33,5	1200	956	4	1,0	278	0,18	0,65
5	32,5	1400	1020	5	1,011	288	0,14	0,3
6	34,5	1600	1010	6	1,015	298	0,155	0,4
7	31,5	2000	980	7	1,012	302	0,165	0,5
8	35	1950	990	8	1,014	305	0,175	0,6
9	33	1850	987	9	1,013	303	0,185	0,42

Задача 4

Визначити потужність, витрату палива і термічний ККД ГТУ, якщо теплота згорання палива Q_H^p , витрата робочого тіла G , внутрішній ККД компресора і турбіни – 0,86 і 0,88, відповідно. Параметри робочого тіла в точках циклу: P_1 , бар; T_1 , К; v_2 , м³/кг; міра регенерації дорівнює σ ; а температура повітря після регенератора нижча, ніж температура газів після турбіни, на величину ΔT .

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Варіанти завдань до задачі 4

Остання цифра шифру	Q_H^p , МДж/кг	G , кг/с	σ	Перед-остання цифра шифру	P_1 , бар	T_1 , К	v_2 , м ³ /кг	ΔT , К
0	33	130	0,55	0	1,013	300	0,2	130
1	31	150	0,35	1	1,04	273	0,15	140
2	32	170	0,45	2	1,02	283	0,16	150
3	34	110	0,55	3	1,03	293	0,17	135
4	33,5	120	0,65	4	1,0	278	0,18	145
5	32,5	140	0,3	5	1,011	288	0,14	155
6	34,5	160	0,4	6	1,015	298	0,155	133
7	31,5	200	0,5	7	1,012	302	0,165	143
8	35	190	0,6	8	1,014	305	0,175	153
9	33	180	0,42	9	1,017	303	0,185	125

Задача 5

Виконати розрахунки циклу паротурбінної установки (ПТУ), визначити термічний ККД та витрату умовного палива на ПТУ. Паротурбінна установка працює за циклом Ренкіна. Потужність електрогенератора ПТУ становить N_e . Параметри пари перед турбіною: P_0 та t_0 . Паротурбінна установка має один регенеративний підігрівник РП-1, в якому конденсат підігрівається від температури конденсації до температури $t_{жв}$ парою з відбору турбіни при тиску P_1 . Тиск пари в конденсаторі P_k .

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Варіанти завдань до задачі 5

Остання цифра шифру	P_0 , МПа	t_0 , °C	P_k , бар	Передостання цифра шифру	$t_{жв}$, °C	P_1 , бар	N_e , МВт
0	9	540	0,045	0	75	1,7	250
1	5	510	0,04	1	70	1,4	350
2	8	485	0,05	2	73	1,3	80
3	4	425	0,044	3	67	1,1	220
4	2	440	0,035	4	82	1,45	140
5	3	425	0,043	5	72	1,45	130
6	4	480	0,04	6	70	1,25	220
7	4,5	515	0,04	7	75	1,35	90
8	4,5	455	0,035	8	70	1,2	180
9	3,5	480	0,045	9	73	1,1	100

Задача 6

Виконати розрахунки циклу газотурбінної установки (ГТУ), визначити термічний ККД та витрату умовного палива на ГТУ. Газотурбінна установка працює за циклом Брайтона з регенерацією теплоти. Потужність електрогенератора ГТУ становить N_e . Температура повітря перед компресором T_1 . Температура газів перед турбіною становить T_3 . Міра підвищення тиску в компресорі λ_k . Теплоємність повітря становить $C_{рп} = 1,05$ кДж/(кг·К), теплоємність газів: $C_{рг} = 1,17$ кДж/(кг·К). Значення міри регенерації σ .

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Варіанти завдань до задачі 6

Остання цифра шифру	N_e , МВт	T_1 , К	T_3 , К	Передостання цифра шифру	λ_k	σ
0	6	293	1350	0	6,8	0,4
1	15	298	1423	1	7,1	0,44
2	10	277	1223	2	6,5	0,55
3	11,6	299	1273	3	6,33	0,35
4	16	288	1173	4	5,83	0,435
5	21	293	1244	5	5,88	0,436
6	26	289	1344	6	6,88	0,536
7	26	298	1325	7	6,38	0,55
8	35	283	1373	8	6,35	0,576
9	15	293	1423	9	6,67	0,676

Задача 7

Виконати розрахунки парогазової установки (ПГУ), визначити витрату умовного палива та економію умовного палива в комбінованому циклі, якщо відомо:

- термічний ККД циклу ГТУ $\eta_{\text{ГТУ}}$;
- потужність електрогенератора ГТУ $N_e^{\text{ГТУ}}$, МВт;
- витрата робочого тіла в ГТУ $G_{\text{Г}}$ кг/с;
- температура газів після турбіни T_4 , К;
- температура відхідних газів після регенератора $T_{\text{ВГ}}$, К;
- витрата пари на парову турбіну D_o , кг/с;
- температура живильної води після РП-1 t_1 , °С;
- ентальпія пари перед турбіною h_o , кДж/кг;
- питома робота в турбіні $l_{\text{Т}}$, кДж/кг;
- потужність електрогенератора ПТУ $N_e^{\text{ПТУ}}$, МВт;
- потужність, підведена в камеру згорання ГТУ $Q_{\text{КЗ}}$, МВт;
- ККД регенеративного теплообмінника $\eta_{\text{ТО}} = 0,98$;
- теплоємність повітря $C_{\text{рп}} = 1,05$ кДж/(кг·К),
- теплоємність газів $C_{\text{рг}} = 1,17$ кДж/(кг·К).

Схема ПГУ показана на рис. 3.1.

Дані, необхідні для розрахунку, вибрати з таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Варіанти завдань до задачі 7

Варіант	$\eta_{\text{ГТУ}}$	$N_e^{\text{ГТУ}}$	$G_{\text{Г}}$	T_4	$T_{\text{ВГ}}$	D_o	t_1	h_o	$l_{\text{Т}}$	$N_e^{\text{ПТУ}}$	$Q_{\text{КЗ}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,35	11,2	29	780	450	30	70	3500	1150	23	32
2	0,377	6	15	700	420	15	77	3350	1200	18	15,9
3	0,4	5,6	12	723	400	20	80	3440	1165	23,3	14
4	0,36	8	14,5	600	400	16	72	3270	1270	20,3	22,4
5	0,365	8	21	677	444	11	71	3335	1180	13	22
6	0,375	6	14	777	432	14	67	3250	1180	16,52	16
7	0,357	6,6	16	613	478	17	69	3350	1275	21,68	18,5
8	0,388	7,1	16	768	484	13	70	3400	1220	16,6	18,3
9	0,339	9	22	732	470	16	73	3425	1167	18,7	26,6

Продовження табл. 4.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,352	8,5	21	733	458	12	73	3440	1218	14,6	24
11	0,34	5,55	14,5	755	410	8	72	3320	1210	9,7	16,3
12	0,377	4,5	10	733	450	11	74	3400	1100	12,1	12
13	0,392	9	21	785	440	16	70	3300	1150	18,4	23
14	0,36	9	23	650	430	12	71	3490	1210	14,5	25
15	0,365	12	30	677	438	18	68	3350	1250	22,5	33
16	0,375	8	19	780	412	15	67	3250	1150	17,32	23,5
17	0,33	9	25	613	478	15	72	3450	1220	17,25	27,4
18	0,388	9,7	23	768	484	17	70	3300	1170	20	25
19	0,33	6	16	732	470	16	72	3450	1150	18,4	18,3
20	0,382	7,5	17	743	438	16	75	3300	1200	19,2	19,7
21	0,35	8	21	780	450	14	70	3500	1200	16,8	23
22	0,377	12	29	700	420	15	73	3350	1100	16,5	32
23	0,4	12,8	29	723	400	19	70	3440	1150	21,9	32
24	0,36	11,5	29	600	400	22	70	3270	1270	28	32
25	0,365	9,5	24	677	444	22	71	3350	1180	26	26
26	0,375	10,5	27	777	432	18	68	3250	1150	20,7	28
27	0,357	10	27	613	478	14	70	3350	1275	17,85	28
28	0,35	9,8	27	678	484	16	70	3400	1220	19,5	28
29	0,339	11,5	33	732	470	18	70	3425	1160	20,9	34
30	0,347	12	35	767	434	25	75	3495	1300	32,5	34,6
31	0,37	10	26	780	450	17	73	3500	1150	19,5	27
32	0,377	9	23	700	420	17	76	3350	1200	20,4	24
33	0,4	6	14	723	400	15	70	3440	1160	17,4	15
34	0,36	5,4	14	600	400	10	72	3270	1270	12,7	15
35	0,365	9,5	27	677	444	23	75	3335	1180	27,14	26
36	0,375	9,75	25	777	432	19	77	3250	1180	22,42	26
37	0,357	8,6	23	613	478	15	69	3350	1275	19,13	24
38	0,388	9	20	768	484	15	70	3400	1220	18,3	23
39	0,339	11,5	32	732	470	22	73	3425	1180	26	34
40	0,352	12	31	733	458	22	73	3440	1170	25,7	34
41	0,34	11,6	32	755	410	24	72	3320	1210	29	34
42	0,377	12	32	733	450	24	74	3400	1100	26,4	32
43	0,392	12	31	785	440	24	70	3300	1150	27,6	30,5
44	0,36	10	26	650	430	22	71	3490	1210	26,6	38
45	0,365	9,5	26	677	438	16	68	3350	1250	20	26
46	0,375	7,5	21	780	412	17	67	3250	1150	19,55	20
47	0,33	6,6	19	613	478	13	72	3450	1220	15,9	20
48	0,388	6	14	768	484	12	70	3300	1170	14	15,5
49	0,33	5	15	732	470	10	72	3450	1150	11,5	15,3
50	0,367	11,2	30	750	450	30	72	3520	1150	23	32
51	0,345	6,5	15	720	420	15	75	3310	1100	18	15,9
52	0,37	6	12	703	403	20	77	3340	1155	23,3	14
53	0,356	8,5	14,5	610	407	16	74	3170	1170	20,3	22,4
54	0,345	8	20	657	434	11	73	3235	1150	13	22
55	0,355	6,5	14	787	452	14	70	3220	1130	16,52	16

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Малярєнко В. А. Енергетичні установки. Загальний курс : навчальний посібник / Малярєнко В. А. – Харків : САГА, 2008. – 320 с.
2. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : Поділля–2000, 2003. – 368 с.
3. Чепурний М. М. Технічна термодинаміка в прикладах і задачах / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 150 с.
4. Остапенко О. П. Технічна термодинаміка : лабораторний практикум / Остапенко О. П. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 92 с.
5. Остапенко О. П. Теплотехнологічні установки. Курсове проектування : навчальний посібник / Остапенко О. П. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 119 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Термодинамічні властивості води і водяної пари в стані насичення

р, бар	t, °С	v', м ³ /кг	v'', м ³ /кг	ρ'', кг/м ³	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7	8
0,010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484
0,015	13,038	0,0010007	87,9	0,01138	54,75	2525	2470
0,020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459
0,025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,5	2539	2451
0,030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444
0,035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438
0,040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433
0,045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427
0,050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423
0,055	34,59	0,0010059	25,77	0,03880	144,95	2564	2419
0,060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415
0,065	37,65	0,0010070	22,02	0,04542	157,68	2570	2412
0,070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409
0,075	40,32	0,0010080	19,23	0,05198	168,8	2574	24,05
0,080	41,54	0,0010085	18,1	0,05525	173,9	2576	2402
0,085	42,69	0,0010090	17,1	0,05849	178,7	2578	2399
0,090	43,79	0,0010094	16,2	0,06172	183,3	2580	2397
0,095	44,84	0,0010098	15,4	0,06493	187,7	2582	2394
0,10	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392
0,11	47,72	0,0010111	13,4	0,07462	199,7	2588	2388
0,12	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207	2591	2384
0,13	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380
0,14	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376
0,15	54	0,0010140	10,02	0,0998	226,1	2599	2373
0,16	55,34	0,0010147	9,429	0,106	231,7	2601	2369
0,17	56,61	0,0010153	8,909	0,1123	236,9	2603	2366
0,18	57,82	0,0010159	8,444	0,1185	241,9	2605	2363
0,19	58,98	0,0010165	8,025	0,1247	246,7	2607	2360
0,20	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358
0,21	61,14	0,0010177	7,304	0,1369	255,9	2611	2355
0,22	62,16	0,0010183	6,992	0,143	260,2	2613	2353
0,23	63,14	0,0010188	6,708	0,1491	264,3	2614	2350
0,24	64,08	0,0101930	6,445	0,1551	268,2	2616	2348
0,25	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272	2618	2346
0,26	65,88	0,0010204	5,977	0,1673	275,7	2620	2344
0,27	66,73	0,0010209	5,769	0,1733	279,3	2621	2342
0,28	67,55	0,0010214	5,576	0,1793	282,7	2623	2640
0,29	68,35	0,0010218	5,395	0,1853	286	2624	2338
0,30	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336
0,32	70,6	0,0010232	4,922	0,20322	295,5	2627	2332
0,34	72,02	0,001024	4,65	0,2151	301,5	2630	2328

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
0,36	73,36	0,0010248	4,407	0,2269	307,1	2632	2325
0,38	74,64	0,0010256	4,189	0,2387	312,5	2634	2322
0,4	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318
0,45	78,75	0,0010282	3,754	0,2797	329,6	2641	2311
0,45	78,75	0,0010282	3,754	0,2797	329,6	2641	2311
0,5	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204
0,55	83,74	0,0010315	2,963	0,3375	350,7	2649	2298
0,6	85,95	0,001033	2,732	0,3661	360	2653	2293
0,65	88,02	0,0010345	2,534	0,3946	368,6	2657	2288
0,7	89,97	0,0010359	2,364	0,423	376,8	2660	2283
0,75	91,8	0,0010372	2,216	0,4512	384,5	2663	2278
0,8	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273
0,85	95,16	0,0010397	1,972	0,5071	398,7	2668	2269
0,9	96,72	0,0010409	1,869	0,535	405,3	2670	2265
0,95	98,21	0,0010421	1,777	0,5627	411,5	2673	2261
1,00	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258
1,1	102,32	0,0010452	1,55	0,6453	428,9	2679	2250
1,2	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244
1,3	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238
1,4	109,33	0,001051	1,236	0,8088	458,5	2690	2232
1,5	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226
1,6	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221
1,7	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216
1,8	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211
1,9	118,62	0,0010591	0,929	1,076	497,9	2704	2206
2	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202
2,1	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198
2,2	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193
2,3	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524	2713	2189
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,34	529,8	2715	2185
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175
2,8	131,2	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2724	2167
3	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,85	575,7	2730	2154
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,01	592,8	2735	2142
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136
4	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131
4,2	145,32	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121
4,6	148,73	0,0010892	0,4054	2,467	626,9	2745	2118
4,7	149,53	0,0010901	0,3973	2,517	630,3	2746	2116
4,8	150,31	0,001091	0,3895	2,568	633,7	2747	2113
4,9	151,08	0,0010918	0,3819	2,618	636,9	2748	2111
5	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109
5,2	153,32	0,0010943	0,3612	2,769	646,5	2750	2104
5,4	154,76	0,001096	0,3485	2,869	652,7	2752	2099
5,6	156,16	0,0010976	0,3368	2,969	658,8	2754	2095
5,6	156,16	0,0010976	0,3368	2,969	658,8	2754	2095
5,8	157,52	0,0010992	0,3258	3,069	664,7	2755	2090
6	158,84	0,0011007	0,3156	3,16	670,5	2757	2086
6,2	160,12	0,0011022	0,306	3,268	676	2758	2082
6,4	161,37	0,0011037	0,297	3,367	681,5	2760	2078
6,6	162,59	0,0011052	0,2885	3,467	686,9	2761	2074
6,8	163,79	0,0011066	0,2804	3,566	692,1	2762	2070
7	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067
7,2	166,1	0,0011095	0,2656	3,765	702,2	2765	2063
7,4	167,21	0,0011109	0,2588	3,864	707,1	2766	2059
7,6	168,3	0,0011123	0,2523	3,963	711,8	2767	2055
7,8	169,37	0,0011136	0,2462	4,062	716,4	2768	2052
8	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048
8,2	171,44	0,0011162	0,2347	4,26	725,4	2770	2045
8,4	172,44	0,0011175	0,2294	4,359	729,8	2771	2041
8,6	173,43	0,0011187	0,2243	4,458	734,2	2772	2038
8,8	174,4	0,00112	0,2195	4,556	738,6	2773	2034
9	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031
9,2	176,29	0,0011225	0,2104	4,753	746,9	2775	2028
9,4	177,21	0,0011237	0,2061	4,852	750,9	2776	2025
9,6	178,12	0,0011249	0,202	4,949	754,8	2777	2022
9,8	179,01	0,0011261	0,1982	5,045	758,8	2778	2019
10	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015
10,5	182,00	0,0011303	0,1856	5,388	772,1	2779	2007
11	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000
11,5	186,04	0,0011358	0,1701	5,879	789,8	2783	1993
12	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987
12,5	189,8	0,0011412	0,157	6,369	806,5	2786	1980
13	191,6	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973
13,5	193,34	0,0011464	0,1458	6,859	822,3	2789	1967
14	195,04	0,001149	0,1408	7,103	830	2790	1960
14,5	196,68	0,0011515	0,1361	7,348	837,4	2791	1954
15	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
15,5	199,84	0,0011563	0,1276	7,837	851,5	2793	1941
16	201,36	0,0011586	0,1238	8,08	858,3	2793	1935
16,5	202,85	0,0011609	0,1201	8,325	865	2794	1929
17	204,3	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923
17,5	205,72	0,0011655	0,1135	8,812	878,1	2796	1918
18	207,1	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912
18,5	208,45	0,0011700	0,1075	9,303	890,6	2797	1907
19	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901
19,5	211,09	0,0011744	0,1021	9,795	902,6	2799	1896
20	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891
20,5	213,62	0,0011788	0,09719	10,29	914,2	2800	1886
21	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880
21,5	216,05	0,001183	0,09276	10,78	925,4	2800	1875
22	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870
19,5	211,09	0,0011744	0,1021	9,795	902,6	2799	1896
22,5	218,41	0,0011872	0,08869	11,28	936,3	2801	1865
23	219,5	0,0011892	0,8679	11,52	941,5	2801	1860
23,5	220,67	0,0011912	0,08498	11,77	946,7	2802	1855
24	221,77	0,0011932	0,8324	12,01	951,8	2802	1850
24,5	222,85	0,0011952	0,08156	12,26	956,8	2802	1845
25	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840
25,5	224,99	0,0011992	0,07837	12,76	966,8	2803	1836
26	226,03	0,0012012	0,7688	13,01	971,7	2803	1831
26,5	227,05	0,0012031	0,07545	13,25	976,6	2803	1820
27	228,06	0,001205	0,07406	13,5	981,3	2803	1822
27,5	229,06	0,0012069	0,07271	13,75	985,9	2803	1817
28	230,04	0,0012088	0,07141	14	990,4	2803	1813
28,5	231,01	0,0012107	0,07016	14,25	994,9	2803	1808
29	231,96	0,0012126	0,06895	14,5	999,4	2803	1804
29,5	232,9	0,0012145	0,06778	14,75	1003,8	2804	1800
30	233,83	0,0012163	0,06665	15	1008,3	2804	1796
31	235,66	0,0012201	0,0645	15,5	1016,9	2804	1787
32	237,44	0,0012238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778
33	239,18	0,0012274	0,06055	16,52	1033,7	2803	1769
34	240,88	0,001231	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761
35	242,54	0,0012345	0,05704	17,53	1049,8	2803	1753
36	244,16	0,001238	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745
37	245,75	0,0012415	0,05391	18,55	1065,2	2802	1737
38	247,31	0,001245	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729
39	248,84	0,0012485	0,05108	19,58	1080,2	2801	1721
40	250,33	0,001252	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713
41	251,8	0,0012554	0,04852	20,61	1094,7	2800	1705
42	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698
43	254,66	0,0012622	0,04617	21,66	1108,5	2799	1691
44	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683
45	257,41	0,001269	0,04404	22,71	1122,1	2798	1676

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
46	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668
47	260,07	0,0012757	0,0421	23,76	1135,4	2796	1661
48	261,37	0,001279	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654
49	262,65	0,0012824	0,04029	24,82	1148,2	2795	1647
50	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640
51	265,15	0,001289	0,03863	25,89	1160,6	2793	1632
52	266,38	0,0012923	0,03784	26,43	1166,8	2792	1625
53	267,58	0,0012955	0,03708	26,97	1172,9	2791	1618
54	268,77	0,0012988	0,03635	27,51	1179	2791	1612
55	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6
56	271,1	0,0013054	0,03495	28,61	1190,8	2789	1597,7
57	272,24	0,0013087	0,03429	29,16	1196,6	2788	1591
58	273,6	0,001312	0,03365	29,72	1202,4	2786	1584,3
59	274,47	0,0013152	0,03303	30,28	1208,2	2786	1577,6
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8
61	276,64	0,0013217	0,03185	31,4	1219,6	2784	1564,1
62	277,71	0,001325	0,0313	31,95	1225,1	2782	1557,4
63	278,76	0,0013282	0,03076	32,51	1230,6	2781	1550,7
64	279,8	0,0013314	0,03024	33,07	1236	2780	1544,1
65	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5
66	281,85	0,001338	0,02923	34,21	1246,6	2778	1530,9
67	282,86	0,0013412	0,02874	34,79	1251,8	2776	1524,4
68	283,85	0,0013445	0,02827	35,37	1257	2775	1517,9
69	284,83	0,0013478	0,02782	35,95	1262,2	2773	1511,4
70	285,8	0,001351	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9
71	286,76	0,0013542	0,02694	37,12	1272,5	2771	1498,4
72	287,71	0,0013574	0,02652	37,71	1277,6	2769	1492
73	288,65	0,0013607	0,02611	38,3	1282,6	2768	1485,6
74	289,58	0,001364	0,02571	38,89	1287,6	2767	1479,2
75	290,5	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8
76	291,41	0,0013706	0,02494	40,09	1297,7	2764	1466,4
77	292,32	0,0013739	0,02457	40,7	1302,6	2763	1460
78	293,22	0,0013772	0,02421	41,3	1307,4	2761	1453,7
79	294,1	0,0013805	0,02386	41,91	1312,2	2759	1447,4
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317	2758	1441,1
81	295,85	0,0013872	0,02318	43,14	1321,8	2757	1434,8
82	296,71	0,0013905	0,02285	43,76	1326,6	2755	1428,5
83	297,56	0,0013938	0,02253	44,38	1331,4	2753	1422,2
84	298,4	0,0013972	0,02222	45	1336,1	2752	1416
85	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8
86	300,07	0,0014039	0,02162	46,25	1345,4	2749	1403,7
87	300,89	0,0014073	0,02132	46,9	1350,1	2747	1397,6
88	301,71	0,0014106	0,02103	47,55	1354,7	2746	1391,5
89	302,52	0,001414	0,02075	48,19	1359,2	2744	1385,4
90	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3
91	304,11	0,0014208	0,02021	49,48	1368,2	2741	1373,2

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
92	304,9	0,0014242	0,01995	50,13	1372,7	2740	1367
93	305,67	0,0014276	0,01969	50,79	1377,1	2738	1360,9
94	306,45	0,001431	0,01944	51,45	1381,5	2736	1354,7
95	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4
96	307,98	0,001438	0,01895	52,77	1390,2	2732	1342,1
97	308,74	0,0014415	0,01871	53,44	1394,5	2730	1335,8
98	309,49	0,001445	0,01848	54,11	1398,9	2728	1329,5
99	310,23	0,0014486	0,01825	54,79	1403,3	2726	1323,2
100	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317
102	312,42	0,0014592	0,01759	56,85	1416,4	2721	1304,6
104	313,86	0,0014664	0,01716	58,27	1425	2717	1292,3
106	315,28	0,0014736	0,01675	59,7	1433,5	2713	1280
108	316,67	0,0014808	0,01636	61,13	1441,9	2709	1267,3
110	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4
112	319,39	0,001496	0,01561	64,05	1458,4	2701	1243
114	320,73	0,001503	0,01526	65,54	1466,6	2697	1230,6
116	322,05	0,001511	0,01491	67,06	1474,8	2693	1218,3
118	323,35	0,001519	0,01458	68,59	1483	2689	1205,9
120	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5
122	325,9	0,001535	0,01395	71,7	1499,2	2680	1181
124	327,15	0,001543	0,01364	73,3	1507,3	2676	1168,5
126	328,39	0,001551	0,01334	74,94	1515,4	2671	1156
128	329,61	0,001559	0,01305	76,61	1523,5	2667	1143,4
130	330,81	0,001567	0,01277	78,3	1531,5	2662	1130,8
132	332	0,001576	0,0125	80	1539,5	2658	1118,2
134	333,18	0,001585	0,01224	81,72	1547,3	2653	1105,5
136	334,34	0,001594	0,01198	83,47	1555,1	2648	1092,7
138	335,49	0,001602	0,01173	85,25	1562,9	2643	1079,9
140	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9
142	337,75	0,00162	0,01125	88,89	1578,7	2633	1053,8
144	338,86	0,001629	0,01101	90,83	1586,6	2628	1040,7
146	339,96	0,001638	0,01078	92,76	1594,5	2622	1027,6
148	341,04	0,001648	0,01056	94,69	1602	2617	1014,5
150	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1
152	343,18	0,001668	0,01014	98,62	1618	2606	987,5
154	344,23	0,001678	0,009928	100,72	1626	2600	973,8
156	345,27	0,001688	0,00972	102,9	1634	2594	960
158	346,3	0,001699	0,009517	105,1	1642	2588	946,1
160	347,32	0,00171	0,009318	107,3	1650	2582	932
162	348,33	0,001721	0,009124	109,6	1658	2576	917,7
164	349,32	0,001732	0,008934	111,9	1666	2569	903,2
166	350,31	0,001744	0,008747	114,3	1674	2562	888,4
168	351,29	0,001756	0,008563	116,8	1682	2555	873,4
170	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3
172	353,21	0,001781	0,008203	121,9	1698	2541	843
174	354,17	0,001794	0,008025	124,6	1707	2534	827,4

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8
176	355,11	0,001808	0,007848	127,4	1715	2526	811,4
178	356,04	0,001822	0,007674	130,3	1723	2518	795
180	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2
182	357,87	0,001853	0,007336	136,3	1741	2502	761,2
184	358,78	0,00187	0,007169	139,5	1749	2493	743,9
186	359,67	0,001887	0,007003	142,8	1758	2484	726,4
188	360,56	0,001904	0,00684	146,2	1767	2475	708,5
190	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690
192	362,31	0,00194	0,00652	153,4	1785	2456	671
194	363,17	0,001961	0,00636	157,3	1795	2446	651
196	364,02	0,001985	0,00619	161,6	1805	2435	630
198	364,87	0,00201	0,00602	166,1	1816	2423	607
200	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583
202	366,54	0,00207	0,00568	176	1838	2397	559
204	367,37	0,0021	0,00551	181,4	1849	2383	534
206	368,18	0,00213	0,00534	187,2	1861	2369	508
208	368,99	0,00217	0,00516	193,6	1874	2353	479
210	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448
212	370,58	0,00226	0,0048	208,5	1903	2316	413
214	371,4	0,00232	0,0046	217,4	1920	2294	374
216	372,2	0,00239	0,00436	229,3	1940	2269	329
218	372,9	0,00249	0,00402	248,7	1965	2233	268
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску

t, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·°C)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·°C)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,548	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	212	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,803	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	44,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання контрольних робіт
з дисципліни «Енергетичні установки»
для студентів спеціальності
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» заочної форми навчання

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук

Укладач Остапенко Ольга Павлівна

Оригінал-макет підготовлено О. Остапенко

Підписано до друку
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. .
Наклад пр. Зам. № .

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к.114.
Тел. (0432) 59-87-38.
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.