

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни «Енергетичні установки»
для студентів спеціальності
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» всіх форм навчання**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни «Енергетичні установки»
для студентів спеціальності
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» всіх форм 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 лабораторних робіт з дисципліни «Енергетичні установки» для студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» всіх форм навчання / Уклад. О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 42 с.

В методичних вказівках викладено теоретичні основи законів енергоперетворень в енергетичних установках з метою їх застосування для дослідження і аналізу ефективності циклів енергетичних установок, подані лабораторні роботи з дослідження термодинамічних циклів енергетичних установок за допомогою аналітичних програм в середовищі Excel.

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 ЦИКЛИ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК (ГТУ). ЦИКЛ БРАЙТОНА	5
1.1 Цикл Брайтона	6
1.2 Цикл ГТУ з регенерацією	8
2 ЦИКЛИ ПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВОК (ПТУ). ЦИКЛ РЕНКІНА	10
2.1 Цикл найпростішої паротурбінної установки	10
2.2 Регенеративний цикл ПТУ	14
3 ЦИКЛИ ПАРОГАЗОВИХ УСТАНОВОК	18
4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК	20
Лабораторна робота № 1. Дослідження циклу газотурбінної установки з регенерацією теплоти	20
Лабораторна робота № 2. Дослідження впливу параметрів пари на показники роботи циклу Ренкіна	24
Лабораторна робота № 3. Визначення оптимальної температури проміжного перегріву пари в циклі Ренкіна	27
Лабораторна робота № 4. Дослідження циклу парогазової установки	29
Рекомендована література.....	32
Додатки.....	33

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. Загальний зміст і спрямованість лабораторних робіт з дисципліни «Енергетичні установки» – дослідження закономірностей термодинамічних процесів роботи термодинамічних циклів енергетичних установок. Лабораторні роботи виконуються методом математичного моделювання в середовищі Excel.

В запропонованих «Методичних вказівках...» широко подано теоретичний матеріал з термодинамічних циклів енергетичних установок.

Виконання лабораторної роботи починається з домашньої підготовки, в процесі якої студент з'ясовує мету і зміст роботи, вивчає або повторює необхідний теоретичний матеріал згідно з рекомендованою літературою, вивчає схему установки, методику проведення досліджень.

При виконанні лабораторно-розрахункових робіт звіт повинен містити: найменування і мету роботи, схему енергетичної установки і зображення циклу на термодинамічних діаграмах з відповідним позначенням параметрів у характерних точках, математичні формули, необхідні для обчислення циклу (теоретичні основи), вхідні дані, графічну обробку результатів і обґрунтовані висновки.

Перед початком роботи викладачем перевіряється ступінь готовності студента до виконання роботи. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки, підготували звіт і пройшли співбесіду з викладачем.

«Методичні вказівки...» містять необхідні додатки, що полегшує їх використання для вирішення поставлених 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.

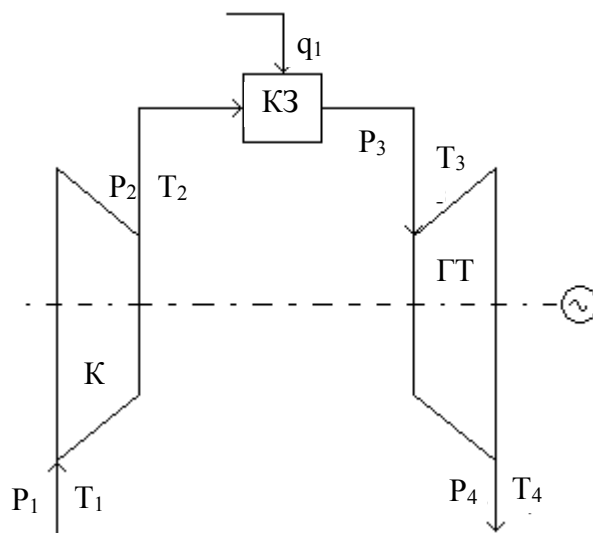


Рисунок 1.1 – Схема ГТУ відкритого типу

В ГТУ відкритого типу (рис. 1.1) компресор (К) стискає повітря з навколишнього середовища, яке з параметрами P_1 , T_1 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;

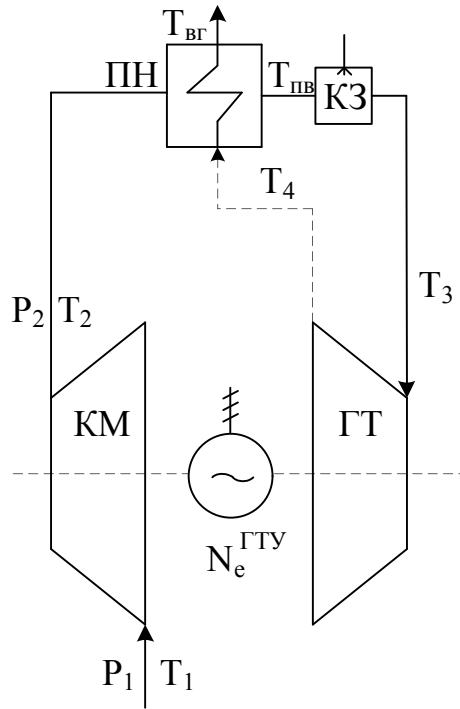
$Q_{\text{н}}^p$ – нижча теплота згорання робочого палива, МДж/м³.

1.2 Цикл ГТУ з регенерацією

Істотним недоліком циклу Брайтона є те, що в ньому не використовуються 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.

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



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

Рисунок 1.2 – Схема газотурбінної установки з регенерацією

Тому ефективність повітрянагрівника характеризується співвідношенням

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

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.

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.

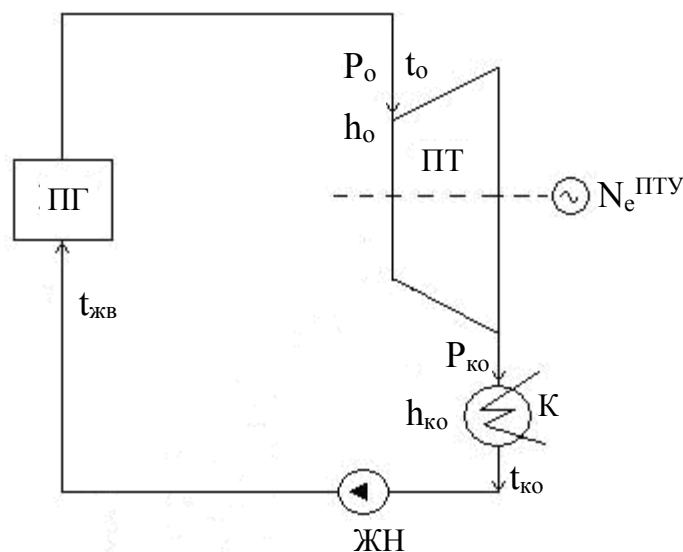


Рисунок 2.1 – Схема найпростішої ПТУ

Живильний насос (ЖН) адіабатно стискує 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 $P_{к0}$, $t_{к0}$, $h_{к0}$, 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 $P_{к0}$ 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 стиснення 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 стиснення води адіабатно необоротні.

Роботи турбіни і насоса в реальних циклах визначаються, відповідно

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

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

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, $\frac{\text{кг}}{(\text{кВт} \cdot \text{год})}$

$$d_o = \frac{3600}{1_{\text{ц}}} = \frac{3600}{(H_p - H_H)}. \quad (2.10)$$

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 визначається, кг у. п. /(кВт·год)

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

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).

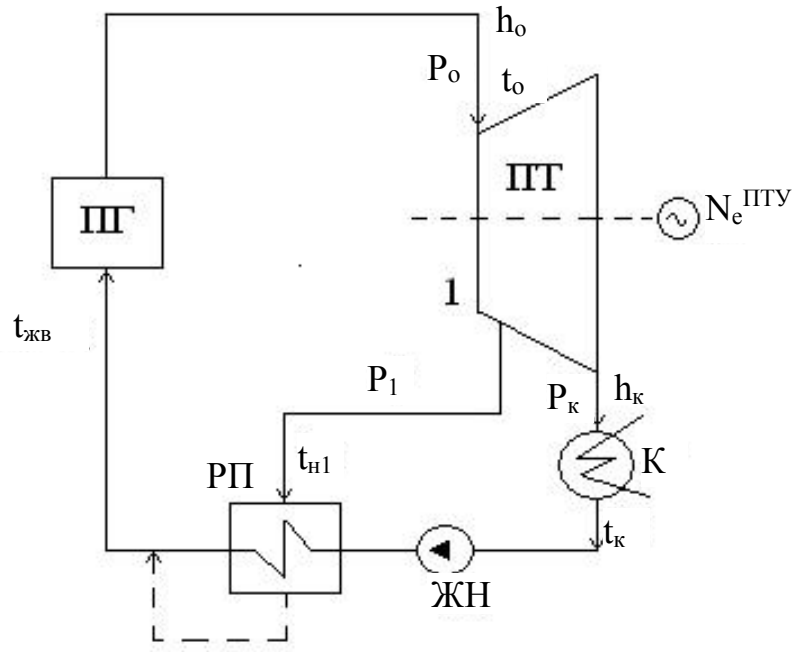


Рисунок 2.2 – Схема ПТУ з одним регенеративним відбором пари

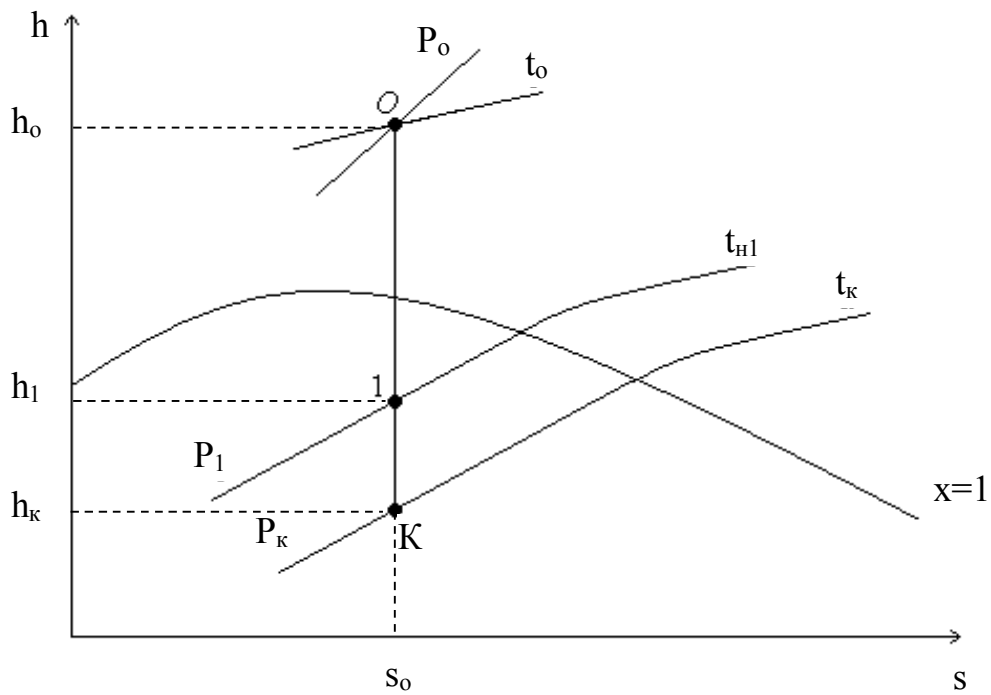


Рисунок 2.3 – Зображення циклу ПТУ з одним регенеративним відбором пари на $h-s$ діаграмі

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;

$q_{п1} = h_1 - C'_p \cdot t_{н1}$ – 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

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

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.

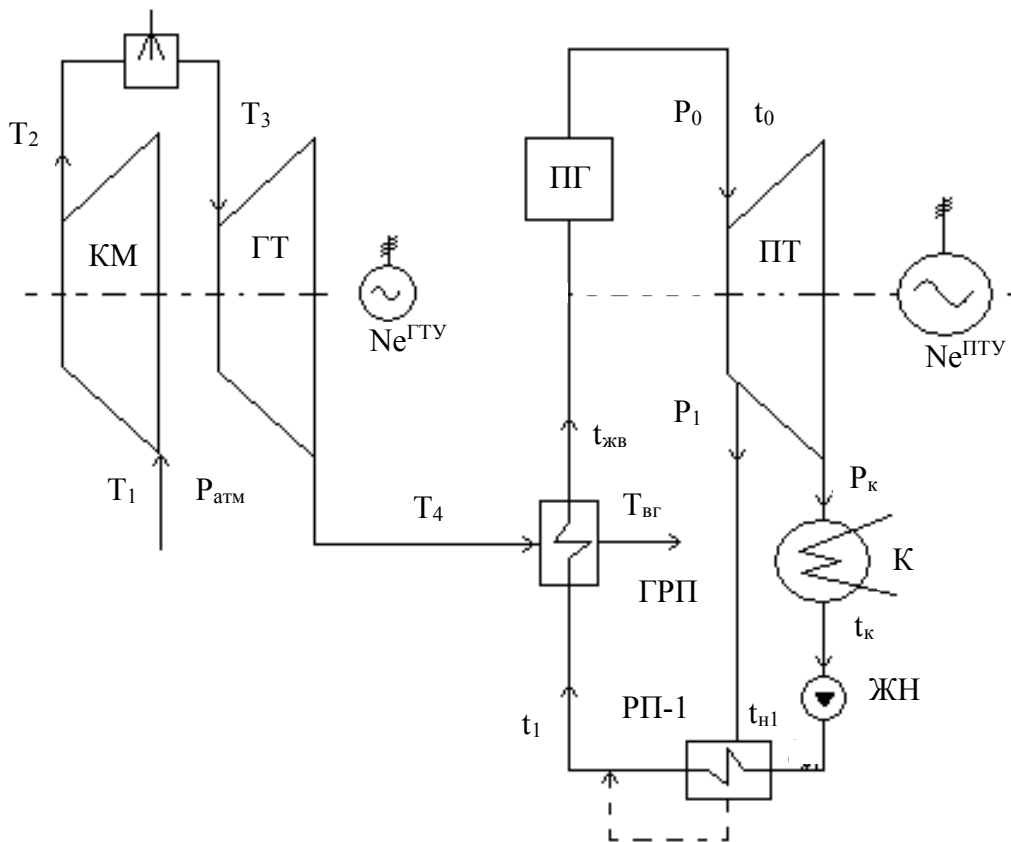


Рисунок 3.1 – Схема ПГУ

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 $t_{жв}$.

Термічний ККД ПГУ

$$\eta_{то}^{пгу} = \frac{N_e^{гту} + N_e^{пту}}{Q_{кз} + Q_{пг}}, \quad (3.1)$$

де $N_e^{гту}$ – потужність електрогенератора ГТУ;

$N_e^{пту}$ – потужність електрогенератора ПТУ;

$Q_{кз}$ – потужність камери згорання ГТУ;

$Q_{пг}$ – потужність парогенератора ПТУ.

Питома витрата умовного палива на ПГУ, кг у. п. / (кВт·год)

$$b_y^{пгу} = \frac{0,123}{\eta_{то}^{пгу}}. \quad (3.2)$$

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

$$B_y^{пгу} = \frac{b_y^{пгу} \cdot (N_e^{гту} + N_e^{пту})}{3,6}. \quad (3.3)$$

Загальна витрата умовного палива на ПТУ і ГТУ, які працюють окремо, кг у. п./с

$$B_y^{окр} = B_y^{гту} + B_y^{пту}. \quad (3.4)$$

Економія умовного палива при використанні ПГУ, %

$$\Delta B_y = \frac{B_y^{окр} - B_y^{пгу}}{B_y^{окр}} \cdot 100\%. \quad (3.5)$$

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛУ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ З РЕГЕНЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ

Мета: дослідити вплив параметрів в камері згорання (міри підвищення тиску і температури), а також міри регенерації на показники роботи газотурбінної установки (ГТУ).

Принципова схема ГТУ зображена на рис. 4.1, а її цикл – на рис. 4.2. Установа складається з компресорів низького 1 і високого 2 тиску, камер згорання 3 і 4, циліндрів газової турбіни 5 і 6, охолодника повітря 8, регенеративного повітропідігрівника 9 і електрогенератора 7.

Цикл ГТУ наближений до реального, тому процеси стиснення і розширення обчислюються з урахуванням ККД компресора і турбіни. З принципами роботи ГТУ і методами її розрахунків треба ознайомитись в процесі домашньої підготовки до роботи. Початкові дані видаються викладачем індивідуально. В процесі досліджень варіюються значення міри підвищення тиску в компресорі B і міри регенерації S .

За результатами розрахунків будуються залежності основних показників роботи ГТУ від змінних величин і визначається їх вплив на економічність роботи, робляться обґрунтовані висновки.

Дослідження циклу ГТУ з регенерацією теплоти проводиться з використанням програми «Дослідження циклу газотурбінної установки з регенерацією теплоти» в середовищі Excel (рис. 4.3).

Початкові дані до програми розрахунків ГТУ за варіантами зведені в таблиці 4.1. Показник адіабати повітря $K_1 = 1,4$. Початкова міра підвищення тиску $B = 2$.

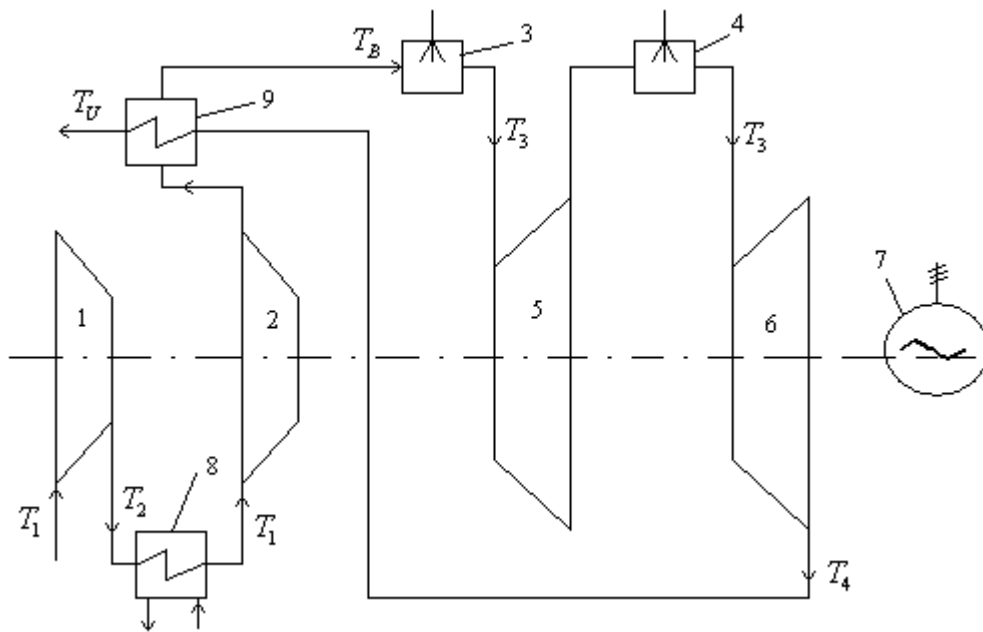


Рисунок 4.1 – Схема ГТУ з міжступінчастим стиском і розширенням та регенерацією

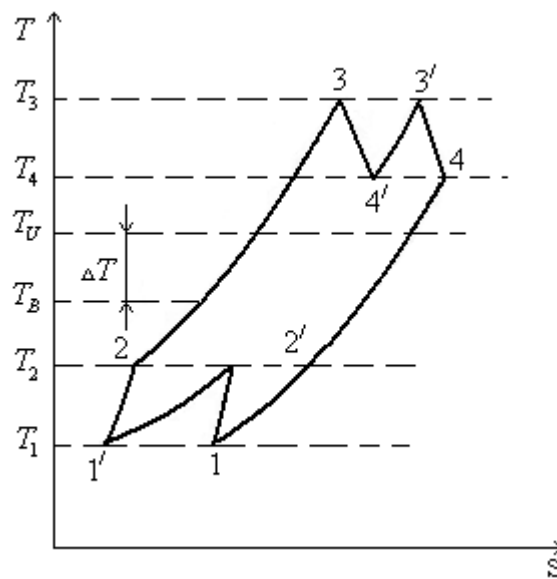


Рисунок 4.2 – Цикл ГТУ за схемою з рис. 4.1

Таблиця 4.1 – Початкові дані до програми розрахунків ГТУ з регенерацією

Варіант	Тиск повітря перед компресором P_1 , бар	Температура повітря перед компресором T_1 , К	Електрична потужність ГТУ N , МВт	ККД турбіни E_2	ККД компресора E_1	Температура перед турбіною T_3 , К	Кінцевий тиск за турбіною P , бар	Показник адіапати газів K_2
1	1,00	290	10	0,87	0,85	1273	1,2	1,66
2	0,98	288	12	0,86	0,85	1173	1,22	1,33
3	0,99	293	16	0,85	0,855	1223	1,25	1,29
4	1,01	289	21	0,87	0,855	1244	1,15	1,33
5	1,02	298	26	0,86	0,85	1323	1,21	1,66
6	0,985	296	29	0,85	0,84	1373	1,23	1,33
7	0,995	294	35	0,87	0,84	1423	1,27	1,29
8	1,013	292	2,6	0,86	0,85	1573	1,17	1,33
9	1,005	289	4	0,85	0,845	1443	1,19	1,66
10	0,987	291	1,8	0,87	0,855	1393	1,2	1,33
11	0,997	287	1,2	0,86	0,84	1193	1,23	1,29
12	1,00	295	3,4	0,85	0,85	1293	1,22	1,33
13	0,98	297	7	0,87	0,845	1343	1,21	1,66
14	0,99	298	4	0,86	0,85	1323	1,18	1,33

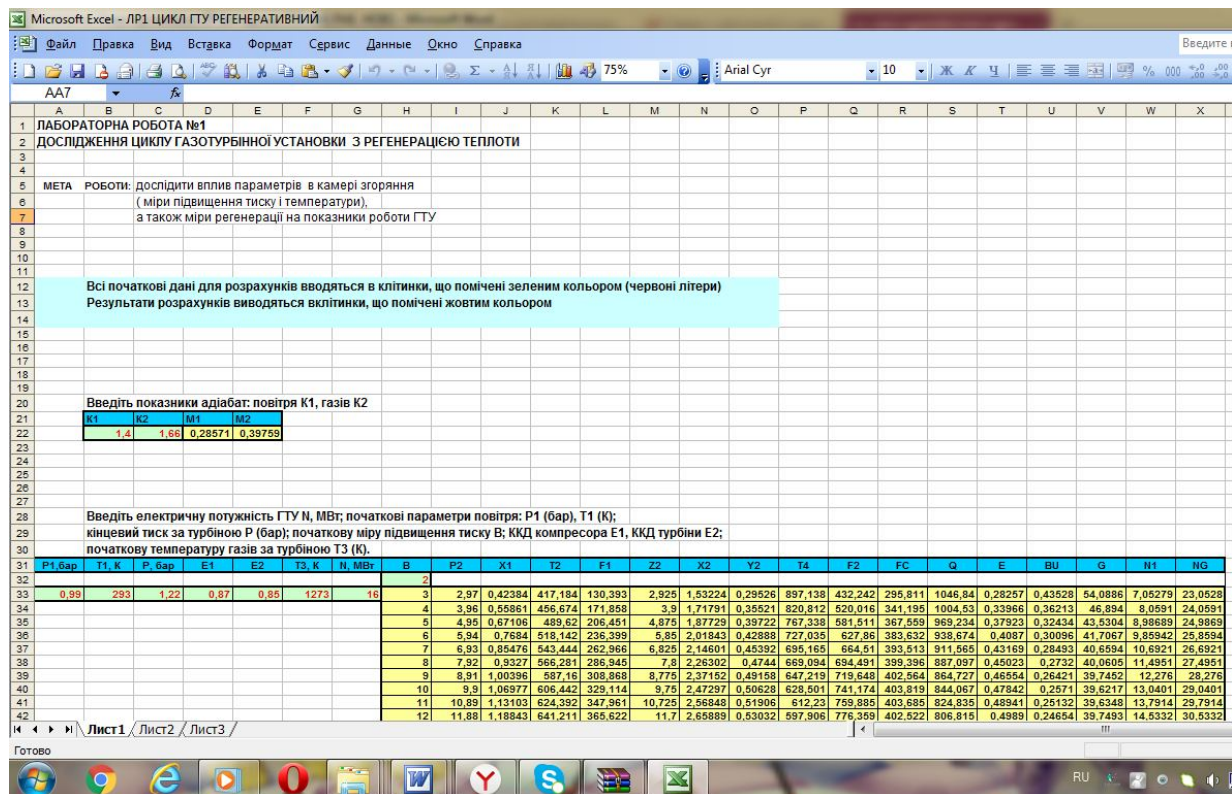


Рисунок 4.3 – Програма дослідження циклу ГТУ в середовищі Excel

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як визначається робота циклу ГТУ?
2. Як визначається робота компресора в циклі ГТУ?
3. Як визначається робота турбіни в циклі ГТУ?
4. Де здійснюється підведення теплоти в циклі ГТУ та як визначається підведена теплота?
5. Як визначається термічний ККД циклу ГТУ?
6. Як визначається питома витрата палива на ГТУ?
7. Як визначається загальна витрата палива на ГТУ?
8. З якою метою використовується регенеративне підігрівання повітря в циклі ГТУ?
9. Що називається мірою регенерації в циклі ГТУ та як вона визначається?
10. Чи можна досягнути повної регенерації в циклі ГТУ і за яких умов?

11. Як впливає регенеративне підігрівання повітря на значення термічного ККД в циклі ГТУ?
12. Як визначається потужність циклу ГТУ (електрогенератора)?
13. Як визначається потужність компресора в циклі ГТУ?
14. Як визначається потужність турбіни в циклі ГТУ?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПАРИ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ЦИКЛУ РЕНКІНА

Мета: на підставі варіантних розрахунків визначити вплив початкових і кінцевих параметрів пари на техніко-економічні показники роботи циклу паросилової установки (Ренкіна).

При підготовці до роботи визначається теплова схема установки, робиться її зарисовка і зображення циклу Ренкіна на $h-s$ діаграмі, виписуються формули для розрахунків циклу Ренкіна.

Дослідження циклу паротурбінної установки (ПТУ) проводиться з використанням програми «Дослідження впливу параметрів пари на показники роботи циклу Ренкіна» в середовищі Excel (рис. 4.4). За результатами розрахунків визначається міра впливу окремих параметрів на економічність роботи циклу, будуються відповідні залежності і робляться висновки.

Початкові дані до програми розрахунків ПТУ за варіантами зведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Початкові дані до програми розрахунків циклу Ренкіна

Варіант	Параметри пари перед турбіною			Параметри пари в конденсаторі		
	Ентальпія H0, кДж/кг	Температура T0, °C	Тиск P0, кПа	Ентальпія HK, кДж/кг	Температура TK, °C	Тиск PK, кПа
1	3500	550	14000	2060	35	60
2	3425	480	3000	2200	33	50
3	3530	570	12000	2275	33	50
4	3480	550	12000	2280	33	50
5	3410	510	9000	2251	29,5	40
6	3360	450	2000	2300	30	50
7	3270	420	4000	2200	33	40
8	3350	500	12000	2250	30	45
9	3300	470	14000	2100	35	50
10	2920	350	10000	2000	30	50
11	3090	400	11000	1980	33	80
12	3220	450	12000	2070	35	55
13	3390	500	9000	2220	30	40
14	3270	420	3000	2250	35	45

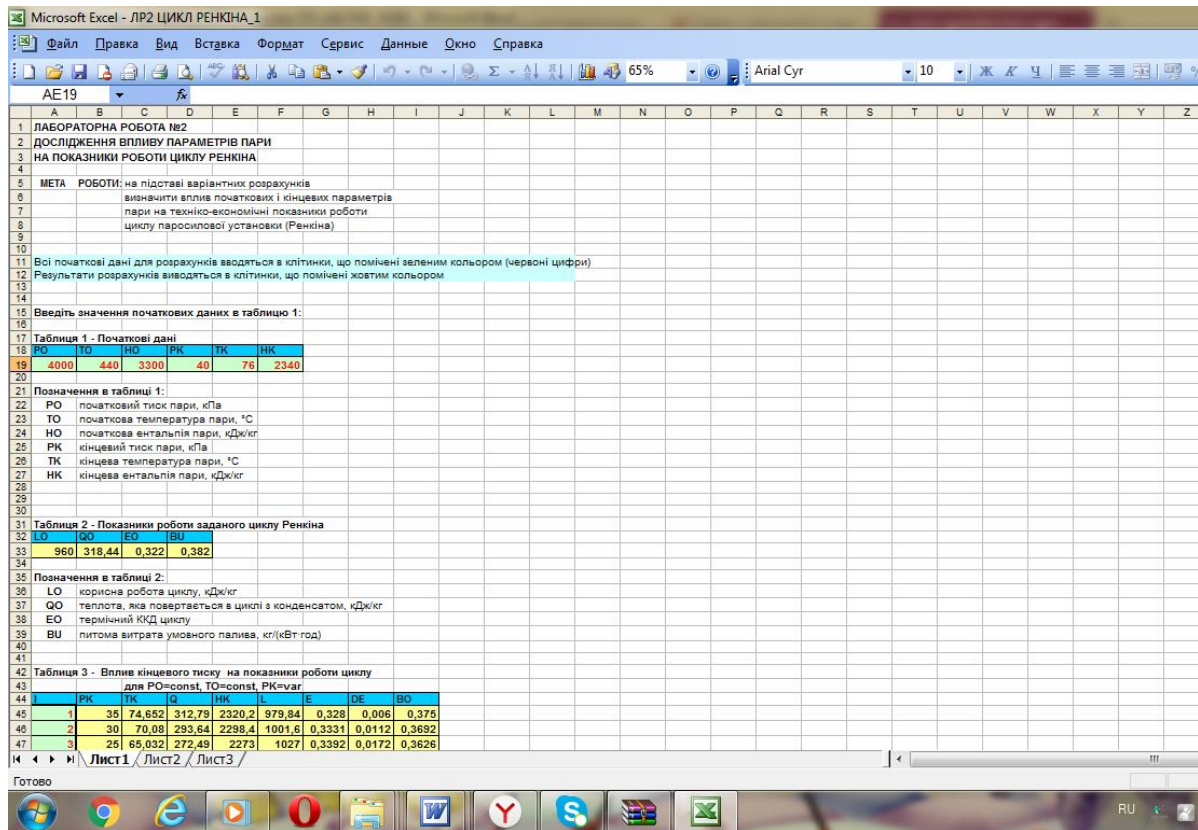


Рисунок 4.4 – Програма дослідження впливу параметрів пари на показники роботи циклу Ренкіна в середовищі Excel

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що розуміють під корисною роботою циклу Ренкіна?
2. Як визначаються теплові втрати в конденсаторі парової турбіни?
3. Як впливає підвищення початкового тиску на значення ентальпій пари перед турбіною і в конденсаторі в циклі Ренкіна?
4. Як впливає збільшення початкової температури пари перед турбіною на ефективність циклу ПТУ?
5. Як впливає підвищення початкових параметрів пари (тиску і температури) на ефективність циклу ПТУ?
6. Що розуміють під питомою витратою пари і питомою витратою палива в циклі Ренкіна?
7. Як визначається термічний ККД теоретичного і реального циклу ПТУ?
8. Як впливає величина втрат в конденсаторі на термічний ККД ПТУ?
9. Як впливає збільшення початкового тиску пари перед турбіною на ефективність циклу ПТУ?

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПРОМІЖНОГО ПЕРЕГРІВУ ПАРИ В ЦИКЛІ РЕНКІНА

Мета: дослідити вплив проміжного перегріву пари на показники роботи ПТУ, визначити оптимальний тиск (температуру) проміжного перегріву пари.

Під час домашньої підготовки треба з'ясувати, для чого використовують проміжний перегрів пари в паротурбінних установках (ПТУ), зобразити цикл ПТУ з проміжним перегрівом на $h-s$ діаграмі, виписати необхідні формули для визначення техніко-економічних показників його роботи, підготувати початкові дані. Згідно з виданими викладачем даними: тиском P_0 та температурою пари T_0 перед турбіною, із $h-s$ діаграми визначається ентальпія пари перед турбіною H_0 і параметри пари в конденсаторі: температура T_K і ентальпія H_K за відомими значеннями кінцевого тиску P_K і міри сухості пари X . Визначені з діаграми дані вводять в програму «Визначення оптимальної температури проміжного перегріву пари в циклі Ренкіна» в середовищі Excel (рис. 4.5).

Після розрахунків будують залежності техніко-економічних показників роботи ПТУ від значення тиску (температури), з яким пара надходить на проміжний перегрів. Ці показники порівнюються з аналогічними показниками ПТУ, яка працює при відсутності проміжного перегріву. Оптимальний тиск і відповідна йому температура проміжного перегріву визначаються за найбільшим приростом ККД установки. Розрахунки проводяться при різних початкових параметрах пари. Відшукується залежність оптимальної температури проміжного перегріву від початкового тиску пари перед турбіною, визначається інтервал тисків, при якому проміжний перегрів доцільний.

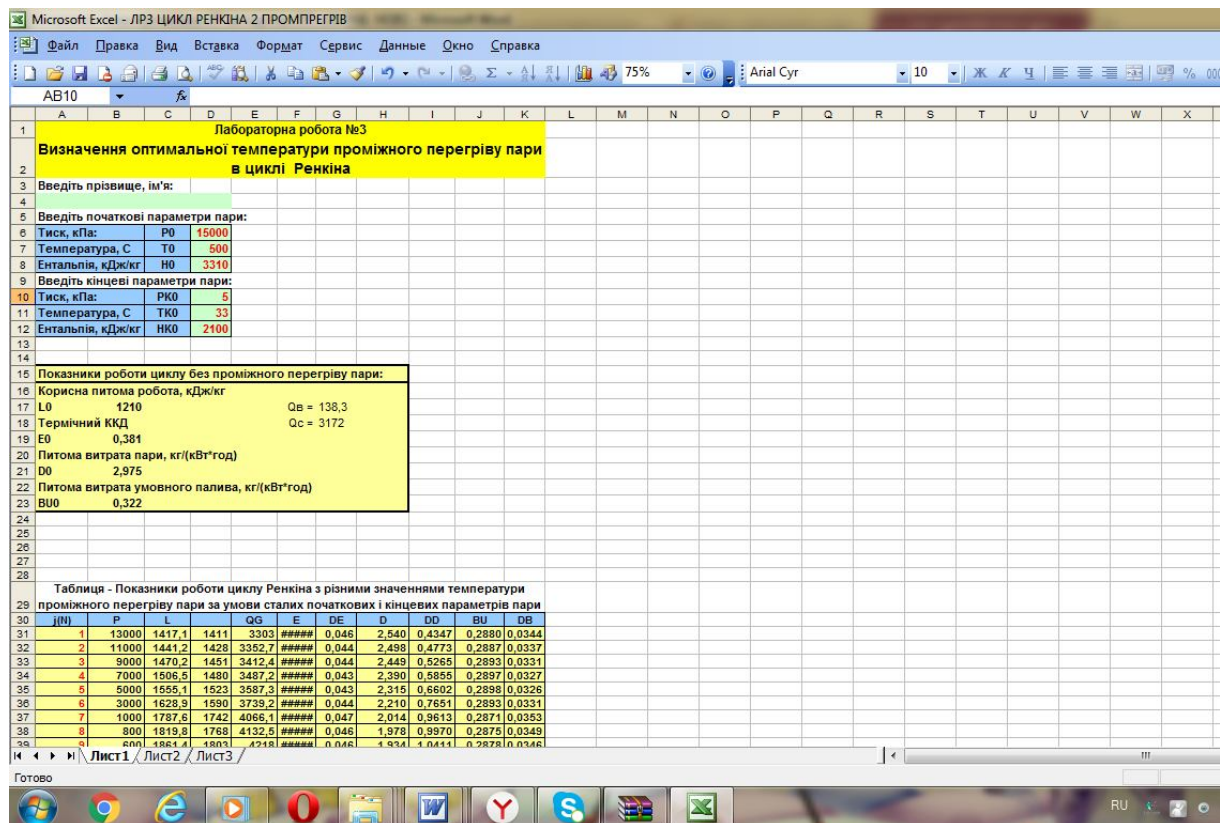


Рисунок 4.5 – Програма визначення оптимальної температури проміжного перегріву пари в циклі Ренкіна в середовищі Excel

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. З якою метою застосовують проміжний перегрів пари?
2. Як проміжний перегрів впливає на економічність роботи ПТУ?
3. За яких умов проміжний перегрів впливає на економічність роботи ПТУ?
4. Чому при зростанні початкового тиску застосування проміжного перегріву більш доцільне?
5. З якою метою запроваджують регенеративний підігрів живильної води в циклі ПТУ?
6. Що розуміють під коефіцієнтом недовиконання роботи (потужності) при роботі турбіни з відборами пари?
7. Як впливає температура живильної води на ефективність циклу ПТУ?
8. Як впливає наявність відборів пари на значення термічного ККД ПТУ?
9. Як визначити термічний ККД циклу ПТУ з регенерацією?

10. Як визначається теоретична робота пари в турбіні при роботі турбіни з відборами пари?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛУ ПАРОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

Мета: дослідити вплив параметрів паротурбінної та газотурбінної установок на показники роботи парогазової установки (ПГУ).

Принципова схема ПГУ зображена на рис. 3.1, а принцип дії ПГУ наведено в розділі 3. З методами розрахунків ПГУ слід ознайомитись в процесі домашньої підготовки до роботи. Початкові дані видаються викладачем індивідуально.

За результатами розрахунків будуються залежності основних показників роботи ПГУ від змінних величин, визначається міра впливу окремих параметрів на економічність роботи циклу ПГУ, робляться обґрунтовані висновки.

Дослідження циклу ПГУ проводиться з використанням програми «Дослідження циклу ПГУ» в середовищі Excel (рис. 4.6).

Початкові дані до програми розрахунків ПГУ за варіантами зведені в таблиці 4.3. Пояснення позначень в таблиці 4.3 щодо показників і параметрів ПГУ та ГТУ наведено в розділах 1 – 3 та в програмі «Дослідження циклу ПГУ».

Таблиця 4.3 – Початкові дані до програми розрахунків циклу парогазової установки

Варі-ант	Показники та параметри ПТУ						Показники та параметри ГТУ				
	$N_e^{ПТУ}$, МВт	P_o , МПа	t_o , °С	P_1 , бар	t_1 , °С	P_k , бар	$N_e^{ГТУ}$, МВт	T_1 , К	$\lambda = \frac{P_2}{P_1}$	T_3 , К	$T_{вг}$, К
1	12	5	510	1,6	75	0,05	5	290	6	1225	423
2	20	7,5	535	2	70	0,045	8	283	5	1173	433
3	20	8	530	1,7	75	0,05	15	283	5,2	1223	428
4	40	5,5	535	1,9	85	0,035	12,5	280	7	1253	443
5	50	10	545	2,2	85	0,04	16	293	6,4	1193	428
6	75	9	525	1,8	90	0,045	26	275	5,8	1153	433
7	100	12	535	2,2	85	0,04	35	288	8	1223	430
8	130	12,5	540	1,8	75	0,035	45	268	8,2	1173	428
9	160	12,7	545	1,6	80	0,03	50	298	7,4	1073	438
10	200	13	550	2,2	90	0,04	70	300	6,8	1023	423
11	50	5	520	1,7	70	0,045	30	293	6,5	1223	433

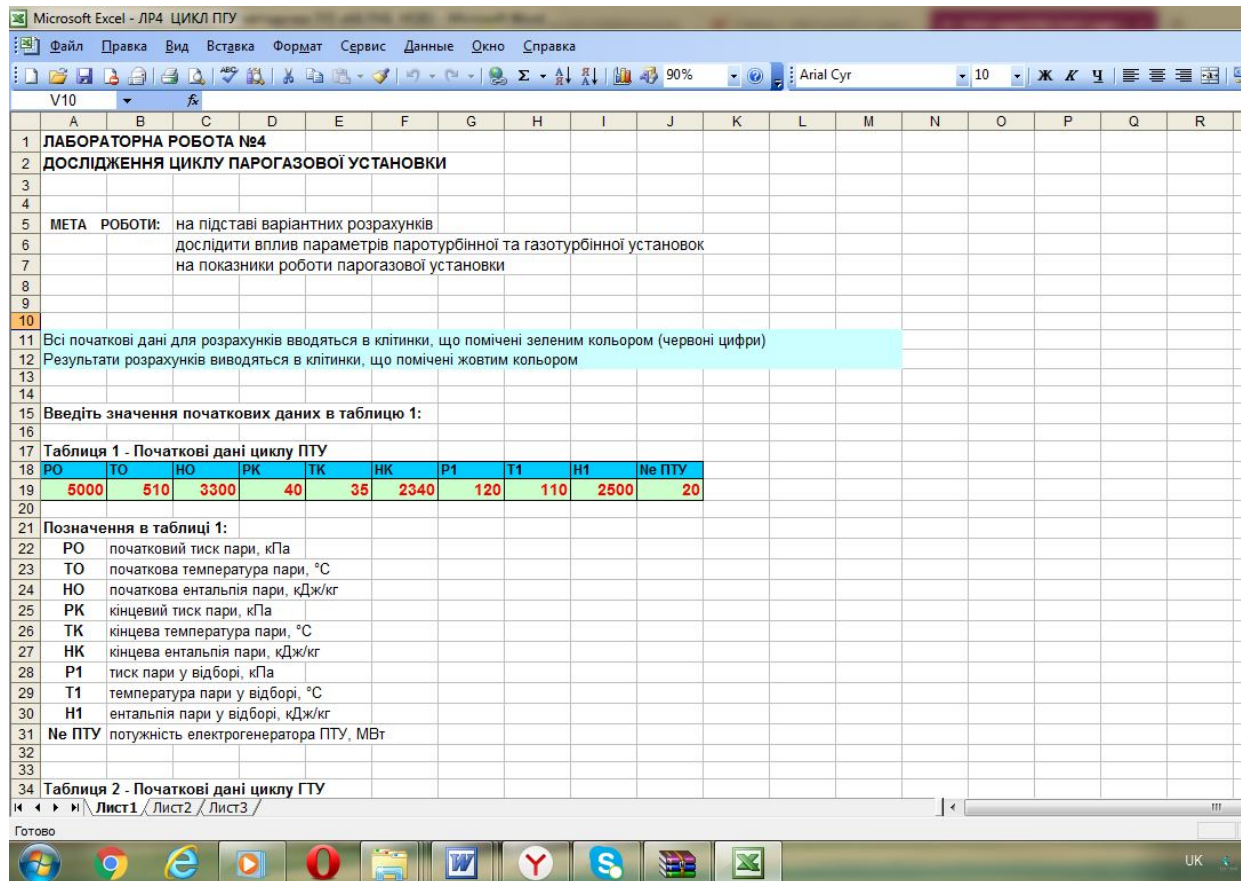


Рисунок 4.6 – Програма дослідження циклу ПГУ в середовищі Excel

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як визначити термічний ККД циклу ПГУ?
2. Як визначається питома витрата умовного палива на ПГУ?
3. Як визначається загальна витрата умовного палива на ПГУ?
4. Як визначається економія умовного палива в циклі ПГУ?
5. Як визначається електрична потужність ПГУ?
6. Як визначити затрати теплової потужності в циклі ПГУ?
7. Як впливає температура живильної води на ефективність циклу ПГУ?
8. Як впливає температура відхідних газів ГТУ на ефективність циклу ПГУ?

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 лабораторних робіт
з дисципліни «Енергетичні установки»
для студентів спеціальності
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» всіх форм 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.