

М.О. Прядко, В.І. Павелко, С.М. Василенко

# ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

АЕРА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

М. О. Прядко, В. І. Павелко, С. М. Василенко

# ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ

*За редакцією д-ра техн. наук,  
проф. М. О. Прядка*

*Рекомендовано Міністерством освіти  
і науки України як навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів,  
що навчаються за спеціальністю  
„Теплоенергетика”*

Київ • Алерта • 2005

ББК 31.3  
УДК 697.34  
П68

*Рецензенти:*

**М. К. Безродний** – д-р. техн. наук, проф., зав. кафедри теоретичної і промислової теплотехніки НТУУ «КПІ»;

**В. П. Марценко** – головний інженер підприємства «Київжитло-тепло-комуненерго».

*Гриф надано Міністерством освіти України  
(Лист №2/1263 від 18.07.2000 р.)*

**Прядко М. О., Павелко В. І., Василенко С. М.**  
**П68** Теплові мережі: Навчальний посібник / За ред.  
М. О. Прядка. – К.: Алерта, 2005. – 227 с.

ISBN 966-8533-28-3

Викладено основи теплофікації, описано системи централізованого тепlopостачання, наведено методи розрахунку систем тепlopостачання, теплових мереж і абонентських вводів.

Для студентів, які навчаються за спеціальністю «Теплоенергетика», фахівців з проектування і експлуатації теплофікаційних систем.

ББК 31.3  
УДК 697.34

© М. О. Прядко, В. І. Павелко,  
С. М. Василенко, 2005  
© Видавництво «Алерта», 2005

ISBN 966-8533-28-3

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	<b>3</b>
<b>ГЛАВА 1. ТЕПЛОФІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОФІКАЦІЇ</b> .....	<b>4</b>
1.1. Теплофікація .....	4
1.2. Ефективність теплофікації .....	5
1.3. Оцінка ефективності теплофікації .....	7
1.4. Визначення витрати палива на виробіток електричної енергії та теплоти на паротурбінних ТЕЦ .....	8
1.5. Визначення витрати палива при роздільному виробітку електричної енергії і теплоти .....	20
1.6. Визначення абсолютної економії палива при теплофікації від паротурбінних ТЕЦ .....	22
<b>ГЛАВА 2. ТЕПЛОВЕ СПОЖИВАННЯ</b> .....	<b>26</b>
2.1. Класифікація теплових навантажень та споживачів теплоти .....	26
2.2. Сезонне теплове навантаження .....	27
2.3. Визначення розрахункової потреби теплоти на ГВП .....	40
2.4. Річні витрати теплоти .....	42
2.5. Побудова графіка залежності витрат теплоти від зовнішньої температури і графіка тривалості теплового навантаження (графіка повторюваності витрат теплоти) .....	44
2.6. Побудова інтегрального графіка теплового навантаження .....	47
<b>ГЛАВА 3. СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ</b> .....	<b>51</b>
3.1. Теплові схеми джерел теплопостачання .....	51
3.2. Принципова схема підготовки теплоносія .....	52
3.3. Класифікація систем теплопостачання .....	60
3.4. Водяні системи теплопостачання .....	61
3.5. Парові системи теплопостачання .....	82
3.6. Вибір теплоносія і системи теплопостачання .....	87
<b>ГЛАВА 4. РЕЖИМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ</b> .....	<b>91</b>
4.1. Методи регулювання теплопостачання .....	91
4.2. Теплові характеристики теплообмінних апаратів .....	96
4.3. Центральне регулювання однорідного теплового навантаження .....	102
4.4. Вибір методу центрального регулювання відпускання теплоти .....	132
4.5. Коефіцієнт теплофікації і режим відбору турбін .....	133

<b>ГЛАВА 5. ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ.....</b>	<b>140</b>
5.1. Схеми і конфігурації теплових мереж .....	141
5.2. Основні залежності для гідравлічного розрахунку трубопроводів теплових мереж .....	145
5.3. Послідовність гідравлічного розрахунку трубопроводів .....	149
5.4. Пієзометричний графік .....	151
5.5. Вибір схеми приєднання опалювальних абонентських установок .....	163
5.6. Методика гідравлічного розрахунку розгалужених теплових мереж .....	166
5.7. Визначення розрахункових витрат води у теплової мережі .....	168
5.8. Визначення параметрів насосів (живильних, підживлювальних, конденсатних).....	169
<b>ГЛАВА 6. ГІДРАВЛІЧНИЙ РЕЖИМ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ .....</b>	<b>172</b>
6.1. Гідравлічна характеристика системи .....	172
6.2. Гідравлічний режим закритих систем тепlopостачання .....	177
6.3. Гідравлічна стійкість .....	182
6.4. Гідравлічний режим теплових мереж з насосними і дроселювальними підстанціями .....	186
6.5. Розрахунок потокорозподілу в кільцевих теплових мережах .....	191
6.6. Гідравлічний удар у теплових мережах .....	197
<b>ГЛАВА 7. ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ .....</b>	<b>209</b>
7.1. Приймання в експлуатацію ТМ, пуск і налагодження СТП .....	209
7.2. Експлуатаційні випробування обладнання систем тепlopостачання .....	212
7.3. Організація експлуатації систем тепlopостачання .....	213
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>219</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>225</b>

*Присвячується 75-річчю  
Національного університету  
харчових технологій та  
50-річчю кафедри теплоенергетики*

## ПЕРЕДМОВА

*Дисципліна «Теплові мережі» є профілюючою в навчальному плані бакалаврів, спеціалістів і магістрів із фаху «Теплоенергетика».*

*Пропонований навчальний посібник написано для студентів, які навчаються за спеціальністю 7.090510 «Теплоенергетика» в обсязі затвердженої навчально-методичною радою НУХТ програми. Він дає змогу засвоїти методику розрахунку теплових навантажень опалення, вентиляції, гарячого водопостачання, набути навичок з проектування систем тепlopостачання та використання технічної довідково-нормативної літератури.*

*Матеріал посібника наближено до реальних умов виконання практичних розрахунків з тепlopостачання промислових і комунально-побутових підприємств, отже, посібник може бути корисним також інженерно-технічним працівникам, що займаються проектуванням, монтажем і експлуатацією систем тепlopостачання.*

*Видання є першою спробою створення навчального посібника з дисципліни «Теплові мережі».*

*Автори висловлюють щире подяку рецензентам – зав. кафедри теоретичної та промислової теплотехніки НТУУ (КПІ), д. т. н. проф. М.К. Безродному та головному інженеру АК „Київенерго-Житлопеллоенерго”, канд. техн. наук В.П. Марценку, критичні зауваження яких сприяли покращенню книги, і інж. К.А. Шишківій та О.С. Венгрику, які внесли багато цінних виправлень.*

*Автори з вдячністю сприймуть усі поради і критичні зауваження щодо поліпшення змісту праці.*

# Глава 1. ТЕПЛОФІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОФІКАЦІЇ

## 1.1. Теплофікація

Науково-технічний прогрес зумовив прискорення розвитку енергетики – комплексу систем і установок для перетворення первинних енергоресурсів у форми енергії, потрібні народному господарству та населенню, і передавання цієї енергії від джерел її виробництва до об'єктів споживання.

З усіх форм вироблюваної енергії найширше застосування мають два її види – електрична і теплота низького та середнього потенціалів, на виробіток яких витрачається 55 % усіх використовуваних первинних паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР). При цьому на виробіток електроенергії витрачається ~ 23 % усіх ПЕР, а теплової енергії низького та середнього потенціалу (опалення, вентиляція, гаряче водопостачання, паропостачання промислових підприємств) ~ 32 % усіх ПЕР.

Для організації раціонального енергоспоживання особливе значення має теплофікація як найдосконаліший метод централізованого теплопостачання і один з основних шляхів зниження питомої витрати палива на виробництво електричної енергії. Вона є також одним із основних методів захисту навколишнього середовища, передусім від теплового забруднення.

Під терміном «теплофікація» розуміємо централізоване теплопостачання на базі теплофікаційного, тобто спільного виробітку теплоти та електричної енергії. У теплофікаційному виробітку полягає основна відмінність теплофікації від так званого роздільного методу енергопостачання, коли електрична енергія виробляється на конденсаційних теплових електростанціях (КЕС), а теплота – у котельнях.

Основний енергетичний ефект теплофікації полягає у заміні теплоти, що виробляється у котельнях, теплою відпрацьованого

теплоносія, що виводиться із теплосилового циклу електростанції, завдяки чому зводиться до мінімуму або взагалі стає відсутнім відведення теплоти в навколишнє середовище при перетворенні хімічної (внутрішньоядерної) енергії палива в електричну.

У теплофікації джерелом виробітку електроенергії і теплоти є теплоелектроцентрально (ТЕЦ).

## 1.2. Ефективність теплофікації

Ефективність теплофікації ґрунтується на реалізації двох основних принципів – раціонального виробництва і постачання: 1 – теплофікаційного виробітку теплоти і електроенергії на ТЕЦ; 2 – централізації тепlopостачання, тобто забезпечення тепловою енергією від одного джерела багатьох споживачів.

### 1.2.1. Теплофікаційний виробіток теплоти і електроенергії

Ефективність теплофікаційного виробітку теплоти і електроенергії наочно ілюструється порівнянням термодинамічних циклів та коефіцієнтів використання теплоти в КЕС, ТЕЦ і котельнях.

На рис. 1.1 зображено найпростіші графіки циклів ТЕЦ і КЕС (ідеальні цикли Ренкіна).

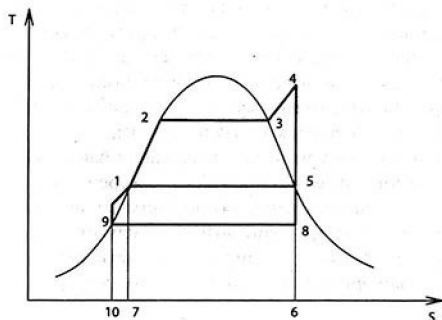


Рис. 1.1

Графіки ідеальних циклів Ренкіна: КЕС – 4-8-9-2-3-4;  
ТЕЦ: 4-5-1-2-3-4

Коефіцієнт використання теплоти, що являє собою відношення теплових еквівалентів корисно - відпускних видів енергії ( $E_{\text{КЕС}}$  або  $E_{\text{ТЕЦ}}$ ) до енергії спаленого палива  $Q_{\text{паль}}$ , для КЕС дорівнює :

$$\eta_{\text{викор.тепл.}}^{\text{КЕС}} = \frac{\text{пл.4} - 8 - 9 - 2 - 3 - 4}{\text{пл.4} - 6 - 10 - 9 - 2 - 3 - 4} = \frac{E_{\text{КЕС}}}{Q_{\text{палива}}} \leq 1 \quad (1.1)$$

Це записано для випадку відсутності втрат у котельній установці, паровій турбіні, генераторі, на власні потреби тощо.

У циклі ТЕЦ:

$$\eta_{\text{викор.тепл.}}^{\text{ТЕЦ}} = \frac{\text{пл.4} - 6 - 7 - 2 - 3 - 4}{\text{пл.4} - 6 - 7 - 2 - 3 - 4} = \frac{E_{\text{ТЕЦ}} + Q_{\text{в.п.}}}{Q_{\text{палива}}} \approx 1 \quad (1.2)$$

де  $Q_{\text{в.п.}}$  – теплота для власних потреб ТЕЦ.

При виробітку теплоти в котельнях коефіцієнт використання теплоти за ідеальних умов  $\eta_{\text{викор.тепл.}}^{\text{кот.}} = 1$ .

Отже, за теплофікаційного виробітку теплоти і електроенергії коефіцієнт використання теплоти вищий, ніж за роздільного.

### 1.2.2. Централізація тепlopостачання

Централізація тепlopостачання – це постачання (подавання) теплоти численним споживачам від одного джерела.

Централізація тепlopостачання сприяє економії палива внаслідок вищого ККД котельних цехів ТЕЦ порівняно з невеликими котельнями, незважаючи на додаткові втрати теплоти в мережах при централізованому тепlopостачанні. Централізація тепlopостачання упорядковує господарства, куди постачається теплота, підвищує комфортність проживання завдяки поліпшенню екологічних умов через віддаленість джерела постачання від споживачів і можливість зменшення до мінімуму шкідливих викидів в атмосферу, зменшує трудовитрати на обслуговування теплового господарства міст та промисловості, створює умови для ефективнішого використання низькосортного палива.

### 1.3. Оцінка ефективності теплофікації

Метод оцінки ефективності теплофікації за допомогою коефіцієнта використання теплоти палива  $\eta_{\text{вик.тепл.}}$  не є повною мірою представницьким і об'єктивним, оскільки більше значення  $\eta_{\text{вик.тепл.}}$  не завжди відповідає більшому енергетичному ефекту.

Річ у тім, що коефіцієнт використання теплоти палива являє собою відношення теплових еквівалентів відпущених з ТЕЦ теплоти та електричної енергії до теплового еквівалента палива, що згоріло:

$$\eta_{\text{викор.тепл.}} = \frac{E_{\text{ТЕЦ}} + Q_{\text{ТЕЦ}}}{BQ_{\text{H}}^p} \quad (1.3)$$

де  $Q_{\text{ТЕЦ}}$  – кількість теплоти, відпущеної з ТЕЦ;

$B$  – витрата умовного палива в ТЕЦ для виробітку теплової та електричної енергії;

$Q_{\text{H}}^p$  – робоча нижча питома теплота згоряння палива.

У виразі (1.3) електрична енергія  $E_{\text{ТЕЦ}}$  оцінюється за тепловим еквівалентом. Проте електрична і тепла енергії, як відомо, не рівноцінні, хоч таке порівняння не суперечить першому закону термодинаміки.

Зменшення виробітку електричної енергії на ТЕЦ за рахунок збільшення виробітку теплоти приводить до деякого зростання  $\eta_{\text{вик.тепл.}}$  внаслідок зменшення втрат у турбогенераторній установці. Однак при цьому народногосподарська ефективність теплофікації зменшується, оскільки недовироблена електроенергія має бути спродукована на КЕС.

Енергетична ефективність теплофікації оцінюється за економією палива  $\Delta B$ , отриманою при теплофікаційному виробітку електроенергії та теплоти порівняно з роздільним:

$$\Delta B = B_p - B_T \quad (1.4)$$

де  $B_p$ ,  $B_T$  – витрата палива при роздільному виробітку електроенергії та теплоти і при теплофікації відповідно, кг ум. пал.

#### 1.4. Визначення витрати палива на виробіток електричної енергії та теплоти на паротурбінних ТЕЦ

Загальна витрата палива на ТЕЦ може бути визначена як сума двох складових:

$$V_{\text{ТЕЦ}} = V_{\text{ТЕЦ}}^e + V_{\text{ТЕЦ}}^t, \quad (1.5)$$

де  $V_{\text{ТЕЦ}}^e$ ,  $V_{\text{ТЕЦ}}^t$  – витрата палива на виробіток електро-енергії та теплоти відповідно, кг ум. пал.

Основними агрегатами сучасних паротурбінних ТЕЦ є теплофікаційні турбіни з відборами пари. Ці турбіни можуть розвивати, як правило, повну електричну потужність незалежно від навантаження теплофікаційних відборів. Проте не всю електроенергію вони виробляють теплофікаційним методом. Частина її виробляється в турбінах потоком пари, яка надходить у конденсатор, тобто конденсаційним методом.

Через це повну кількість електричної енергії, що виробляється на ТЕЦ, у загальному випадку слід розглядати як суму двох складових:

$$E = E_T + E_{\text{Т.к}}, \quad (1.6)$$

де  $E_T$  – теплофікаційний виробіток на базі теплофікації, тобто виробіток електричної енергії на базі зовнішнього теплового споживання, кВт·год;

$E_{\text{Т.к}}$  – конденсаційний виробіток, тобто виробіток електричної енергії на базі теплоти, що відводиться в навколишнє середовище, кВт·год.

Кількість електроенергії, виробленої на ТЕЦ теплофікаційним методом:

$$E_T = e_T \cdot Q_T, \quad (1.7)$$

де  $e_T$  – повний питомий теплофікаційний виробіток електроенергії на ТЕЦ, кВт·год/ГДж;

$Q_T$  – кількість теплоти, відданої з ТЕЦ зовнішнім споживачам, ГДж.

Для визначення величини  $e_T$  і розуміння її фізичної суті розглянемо ідеальний теплофікаційний цикл Карно (рис. 1.2).

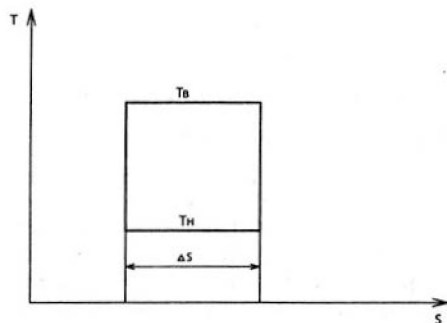


Рис. 1.2

Графік ідеального теплофікаційного циклу Карно

Кількість теплоти, підведеної в цикл:

$$q_n = T_v \cdot \Delta S \quad (1.8)$$

де  $T_v$  – верхня температура підведення теплоти в цикл, К;  
 $\Delta S$  – питома ентропія.

Кількість теплоти, відведеної з циклу:

$$q_T = T_n \cdot \Delta S \quad (1.9)$$

де  $T_n$  – нижня температура відведення теплоти з циклу, К.

Кількість отриманої корисної роботи (виробленої електроенергії) в циклі

$$l_T = (T_v - T_n) \cdot \Delta S \quad (1.10)$$

Повний питомий теплофікаційний виробіток електроенергії, що являє собою відношення теплового еквівалента у виробленої електричної енергії до кількості відпущеної теплоти, в ідеальному теплофікаційному циклі Карно дорівнює

$$[e_T] = \frac{l_T}{q_T} = \frac{(T_v - T_n) \cdot \Delta S}{T_n \cdot \Delta S} = \frac{T_v - T_n}{T_n} = \frac{T_v}{T_n} - 1 \quad (1.11)$$

Якщо значення  $e_T$  у співвідношенні (1.11) виразити у кВт·год/ГДж, то можна записати

$$e_T = 278 \left( \frac{T_B}{T_H} - 1 \right)$$

Якщо ж значення  $e_T$  виразити у кВт·год/Гкал, то, оскільки  $1 \text{ ГДж} = \frac{1}{4,19} \text{ Гкал} = 278 \text{ кВт·год}$ , можна записати

$$e_T = 1163 \left( \frac{T_B}{T_H} - 1 \right), \text{ тобто } 278 \text{ кВт·год/ГДж} = 1163 \text{ кВт·год/Гкал}.$$

Як видно з рівняння (1.11), повний питомий теплофікаційний виробіток електричної енергії збільшується з підвищенням середньої температури підведення теплоти в циклі  $T_B$  та зі зменшенням середньої температури відведення теплоти з циклу  $T_H$ . Цим, зокрема, пояснюється ефективність ступеневого підігрівання води паром із відборів турбіни. При багатоступеному підігріванні частина теплоти відводиться в циклі за більш низької температури  $T_H$ , ніж при одноступеному нагріванні, і в результаті збільшується повний питомий теплофікаційний виробіток електричної енергії, що отримана на базі цієї теплоти.

Величина зміни величини  $[e_T]$  залежно від гранично малої зміни значень  $T_H$  і  $T_B$  визначається як перша похідна величини  $[e_T]$  за значеннями  $T_H$  і  $T_B$ .

$$\frac{d[e_T]}{dT_B} = \frac{1}{T_H} \tag{1.11a}$$

Замінивши гранично малі величини кінцевими різницями, можна отримати:

$$\frac{\Delta[e_T]}{\Delta T_B} = \frac{1}{T_H} \tag{1.11б}$$

Аналогічно при зміні  $T_H$  маємо

$$\frac{d[e_T]}{dT_H} = -\frac{T_B}{T_H^2} \tag{1.11в}$$

або

$$\frac{\Delta[e_\tau]}{\Delta T_H} = -\frac{T_H}{T_H^2} \quad (1.11г)$$

Із співвідношень (1.11б) і (1.11г) видно, що зміна значення  $T_H$  більшою мірою впливає на величину  $[e_\tau]$ :

$$\left[ \frac{\Delta[e_\tau]}{\Delta T_H} \right] : \left[ \frac{\Delta[e_\tau]}{\Delta T_B} \right] = \frac{T_B}{T_H} > 1 \quad (1.11д)$$

Підведення і відведення теплоти в циклі здійснюється у реальних умовах неізотермічно. При цьому під середньою температурою підведення чи відведення теплоти розуміють відношення питомої (віднесеної до 1 кг робочої речовини) кількості підведеної чи відведеної теплоти до величини зміни питомої ентропії робочої речовини в процесі підведення чи відведення теплоти, тобто

$$T_{\text{середн.}} = \frac{\sum Q}{\sum \Delta S} = \frac{\sum T \cdot \Delta S}{\sum \Delta S}, \text{ К} \quad (1.11е)$$

Рівняння (1.11г) свідчить, що чим менше значення  $T_H$ , тим більша величина  $\Delta[e_\tau]/\Delta T_H$ , тобто більша витрата повного питомого теплофікаційного виробітку електроенергії при підвищенні  $T_H$  на деяку величину  $\Delta T_H$ . Всілякі зміни режиму роботи теплоспоживних установок і теплофікаційних мережних підігрівників, що сприяють підвищенню температури  $T_H$ , особливо помітно впливають на значення  $[e_\tau]$  в інтервалі низьких температур відведення теплоти  $T_H$ .

Приклад.  $T_B = 329^\circ\text{C} = 602\text{ К}$

(це відповідає початковим параметрам пари в ТЕЦ:  $P_{\text{пл}} = 13\text{ МПа}$ ;  $t_{\text{н.п}} = 565^\circ\text{C}$ );  $T_H = 100^\circ\text{C} = 373\text{ К}$ .

Зміна середньої температури підведення теплоти на  $1^\circ\text{ К}$  спричинить зміну значення  $[e_\tau]$ :

$$\Delta e_\tau = 1 \frac{1}{373} \cdot 278 = 0,745 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{ГДж}}$$

При зміні середньої температури відведення теплоти на  $1^\circ\text{ К}$  маємо

$$\Delta \epsilon_{\tau} = -\frac{602}{373^2} \cdot 278 = -1,2 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{ГДж}}$$

Якщо при тій самій температурі  $T_B = 602 \text{ К}$  температура  $T_H = 60 \text{ }^\circ\text{C} = 333 \text{ К}$ , то:

при

$$\Delta T_B = 1, \Delta \epsilon_{\tau} = -\frac{1}{333} \cdot 278 = -0,835 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{ГДж}}$$

при

$$\Delta T_H = 1, \Delta \epsilon_{\tau} = -\frac{602}{333^2} \cdot 278 = -1,5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{ГДж}}$$

На сучасних паротурбінних ТЕЦ основний теплофікаційний виробіток електричної енергії здійснюється паром, що надходить з турбіни на теплофікаційні підігрівники, де теплота пари передається мережній воді, якою забезпечуються теплові споживачі за межами ТЕЦ. Сюди ж слід віднести і теплофікаційний виробіток електроенергії паром, що відбирається з турбіни для забезпечення споживачів за межами ТЕЦ. Це так званий теплофікаційний виробіток електроенергії на базі зовнішнього теплового споживання.

Крім того, частина електричної енергії виробляється паром, що відбирається з турбіни для ступеневого, регенеративного нагрівання конденсату, що надходить у систему живлення ТЕЦ з теплофікаційних підігрівників і від споживачів пари за межами ТЕЦ, та хімічно очищеної води, необхідної для забезпечення балансу живильної води в технологічній схемі ТЕЦ. Це так званий теплофікаційний виробіток електроенергії на базі внутрішнього теплового споживання.

На базі теплоти пари із регенеративних відборів турбін на ТЕЦ виробляється теплофікаційним способом додаткова кількість електроенергії, яка становить на сучасних потужних ТЕЦ з високими початковими параметрами пари близько 15 – 20 % теплофікаційного виробітку електроенергії на базі зовнішнього теплового споживання. Неврахування додаткового теплофікаційного виробітку електроенергії ТЕЦ на базі регенеративного підігрівання конденсату може призвести до суттєвого зниження енергетичного ефекту теплофікації.

Через це повний питомий теплофікаційний виробіток електричної енергії на ТЕЦ визначається як сума двох складових:

$$e_T = e_0 + e_{в.т}, \quad (1.12)$$

де  $e_0$  – питомий теплофікаційний виробіток електроенергії на базі зовнішнього теплового споживання;

$e_{в.т}$  – питомий теплофікаційний виробіток електроенергії на базі внутрішнього теплового споживання.

Рівняння (1.12) можна записати так:

$$e_T = e_0(1 + e'_{в.т}), \quad (1.13)$$

де  $e'_{в.т} = \frac{e_{в.т}}{e_0}$  – відносний теплофікаційний виробіток електроенергії

на внутрішньому тепловому споживанні ТЕЦ.

Питомий теплофікаційний виробіток електроенергії на базі зовнішнього теплового споживання з урахуванням реальних втрат у турбогенераторах ТЕЦ визначається такою формулою:

$$[e_0] = \frac{H_T \eta_{вi} \eta_{ем}}{h_T - h_{к.т}} \quad (1.14)$$

або

$$e_0 = 278 \frac{H_T \eta_{вi} \eta_{ем}}{h_T - h_{к.т}}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{ГДж}}$$

де  $H_T$  – адиабатний теплоперепад від параметрів пари перед турбіною до тиску і температури пари в теплофікаційному відборі, кДж/кг;

$\eta_{вi}$  – внутрішній відносний ККД турбіни;

$\eta_{ем}$  – електромеханічний ККД турбогенератора;

$$\eta_{ем} = \eta_{ген} \eta_{мех},$$

тур  $\eta_{ген}$  – ККД електрогенератора ;

$\eta_{мех}$  – ККД механічної передачі від парової турбіни до електрогенератора;

$h_T$  – ентальпія пари в теплофікаційному відборі турбіни, кДж/кг;

$$h_T = h_0 - H_T \eta_{вi} \quad (1.15)$$

тут  $h_0$  – ентальпія пари перед турбіною, кДж/кг;

$h_{к.т}$  – ентальпія конденсату пари із теплофікаційного відбору, кДж/кг.

Точне визначення величини питомого теплофікаційного виробітку  $e_{в.т.}$  на базі внутрішнього теплового споживання ТЕЦ досить складне і має розраховуватись для кожної конкретної схеми ТЕЦ. Для наближеної оцінки величини  $e_{в.т.}$  можна скористатися спрощеним методом, запропонованим проф. Ю.Я.Соколовим [6].

Реальну схему регенеративного підігрівання конденсату замінюють умовною схемою, до складу якої, крім іншого обладнання, входить регенеративний підігрівник змішування (рис. 1.3).

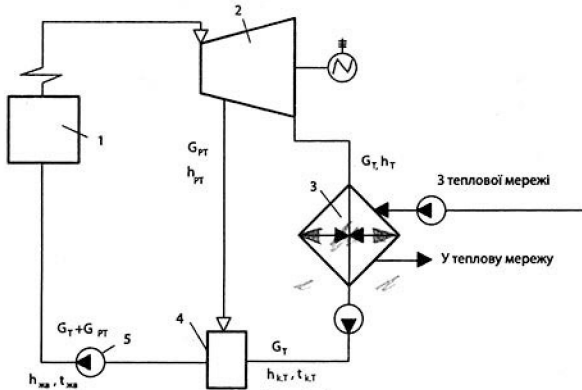


Рис. 1.3

Умовна схема регенеративного підігрівання конденсату теплофікаційної установки ТЕЦ: 1 – парогенератори ТЕЦ; 2 – парова турбіна; 3 – теплофікаційна установка; 4 – регенеративний підігрівник змішування; 5 – живильний насос;  $G_{рм}$  – кількість пари, відібраної у регенеративний підігрівник із турбіни;  $G_m$  – кількість відпрацьованої пари з турбіни;  $h_{рм}$ ,  $h_m$ ,  $h_{к.т}$ ,  $h_{ж.в}$  – ентальпія відповідно пари з регенеративного відбору, відпрацьованої пари, конденсату із теплофікаційної установки, живильної води

Із теплофікаційної установки 3 у регенеративний підігрівник змішування 4 надходить конденсат і нагрівається в ньому від початкової температури  $T_{к.т.}$  до температури живильної води  $T_{ж.в.}$ . Параметри пари, що відбирається в цей умовний підігрівник, обираються таким чином, щоб виробіток електричної енергії на базі теплоти, відведеної в нього, був таким самим, як і при багатоступеневому підігріванні конденсату за регенеративною схемою.

У циклі Карно в реальній схемі при зміні величини  $T_H$  від  $T_{к.т.}$  до  $T_{ж.в.}$  кількість виробленої електричної енергії становить:

$$\int_{T_{к.т.}}^{T_{ж.в.}} 278 [e_r] c dT = \int_{T_{к.т.}}^{T_{ж.в.}} 278 \left( \frac{T_H}{T_H} - 1 \right) c dT =$$

$$= 278c \left[ \int_{T_{к.т.}}^{T_{ж.в.}} \frac{T_H}{T_H} dT - \int_{T_{к.т.}}^{T_{ж.в.}} dT \right] = 278c \left[ T_H \ln \frac{T_{ж.в.}}{T_{к.т.}} - (T_{ж.в.} - T_{к.т.}) \right] \quad (a)$$

В умовній схемі, що розглядається, така сама кількість електроенергії визначається так:

$$278 [e_r'] c (T_{ж.в.} - T_{к.т.}) = 278 c \left( \frac{T_H}{T_{p.т.}} - 1 \right) (T_{ж.в.} - T_{к.т.}) \quad (б)$$

Прирівнюючи вирази (а) і (б), отримаємо:

$$T_H \ln \frac{T_{ж.в.}}{T_{к.т.}} (T_{ж.в.} - T_{к.т.}) = \left( \frac{T_H}{T_{p.т.}} - 1 \right) (T_{ж.в.} - T_{к.т.})$$

або

$$\frac{T_H \ln \frac{T_{ж.в.}}{T_{к.т.}}}{T_{ж.в.} - T_{к.т.}} - 1 = \frac{T_H}{T_{p.т.}} - 1 \quad (в)$$

Із рівняння (в) визначаємо температуру пари, що надходить в умовний регенеративний підігрівник:

$$T_{p.т.} = \frac{T_{ж.в.} - T_{к.т.}}{\ln \frac{T_{ж.в.}}{T_{к.т.}}} \quad (1.16)$$

Приблизно  $T_{p.т.}$  можна визначити як середньоарифметичне значення температур конденсату, який нагрівається, тобто:

$$T_{p.t.} = \frac{T_{ж.в.} + T_{к.т.}}{2}$$

Звідси видно, що  $T_{p.t.} < T_{ж.в.}$ , а це свідчить про умовність схеми, реалізація якої можлива лише за умови  $T_{p.t.} > T_{ж.в.}$ .

Для 1 кг пари, що пройшла через проточну частину турбіни і надійшла в теплофікаційну установку, можна записати:

а) кількість теплоти, відданої зовнішньому споживачеві:

$$q_t = h_t - h_{к.т.} \quad (1.17)$$

б) кількість електроенергії, виробленої цією парою, еквівалентна кількості теплоти:

$$q_c = H_t \eta_{em} \eta_{vi} \quad (1.18)$$

в) питомий теплофікаційний виробіток електроенергії:

$$[e_0] = \frac{q_c}{q_t} = \frac{H_t \eta_{vi} \eta_{em}}{h_t - h_{к.т.}} \quad (1.19)$$

г) кількість пари, що подається у регенеративний підігрівник РП для нагрівання 1 кг конденсату від  $h_{к.т.}$  до  $h_{ж.в.}$

$$d_{p.n} = \frac{h_{ж.в.} - h_{к.т.}}{h_{p.t.} - h_{ж.в.}} \quad (1.20)$$

д) кількість електроенергії, виробленої в турбогенераторі парою, відібраною в регенеративний підігрівник РП, еквівалентна кількості теплоти:

$$q_{e^{p.n}} = d_{p.n} H_{p.t.} \eta_{vi} \eta_{em} = \frac{h_{ж.в.} - h_{к.т.}}{h_{p.t.} - h_{ж.в.}} H_{p.t.} \eta_{vi} \eta_{em} \quad (1.21)$$

е) питомий теплофікаційний виробіток електроенергії на базі внутрішнього теплоспоживання:

$$[e_{s.t.}] = \frac{q_{e^{p.n}}}{q_t} = \frac{h_{ж.в.} - h_{к.т.}}{h_{p.t.} - h_{ж.в.}} H_{p.n} \eta_{vi} \eta_{em} \frac{1}{h_t - h_{к.т.}} \quad (1.22)$$

є) відносний теплофікаційний виробіток електроенергії на базі внутрішнього теплоспоживання:

$$e'_{s.t.} = \frac{[e_{s.t.}]}{[e_0]} = \frac{(h_{ж.в.} - h_{к.т.}) H_{p.n} \eta_{vi} \eta_{em} (h_t - h_{к.т.})}{(h_{p.t.} - h_{ж.в.}) (h_t - h_{к.т.}) H_t \eta_{vi} \eta_{em}} = \frac{H_{p.n} h_{ж.в.} - h_{к.т.}}{H_t h_{p.t.} - h_{ж.в.}} \quad (1.23)$$

Отже, величина  $e'_{s.t.}$  залежить від:

а) початкових параметрів пари, збільшуючись із їх зростанням;

б) температури живильної води, збільшуючись з її підвищенням;

в) тиску пари у відборах теплофікаційних турбін, збільшуючись зі зниженням тиску у відборах.

При неповному поверненні конденсату від споживачів і поповненні втрат його холодною водою величина  $e'_{в.т.}$  зростає.

Витрата палива на виробіток електричної енергії на ТЕЦ визначається за такою формулою:

$$B_{т.е} = b_T^e \cdot E_T + b_{т.к}^e \cdot E_{т.к.}, \quad (1.24)$$

де  $b_T^e$  – питома витрата умовного палива на виробіток електричної енергії парою, що відводиться з турбіни до теплових споживачів, тобто теплофікаційним методом у кілограмах умовного палива на 1 кВт·год;

$b_{т.к}^e$  – питома витрата умовного палива на виробіток електричної енергії парою, що надходить у конденсатор турбіни, тобто конденсаційним потоком, кг ум.пал./кВт·год;

$E_{т.к.}$  – виробіток електроенергії на ТЕЦ конденсаційним методом, кВт·год,

$$E_{т.к.} = E - E_T.$$

Величину  $b_T^e$  визначають за формулою :

$$b_T^e = \frac{I}{\eta_{к.с} \eta_{ем}}, \quad (1.25)$$

де  $\eta_{к.с}$  – ККД котельні електростанції.

Якщо значення  $b_T^e$  виразити в кілограмах умовного палива на 1 кВт·год., то формула (1.25) матиме вигляд

$$b_T^e = \frac{0,123}{\eta_{к.с} \eta_{ем}}, \quad (1.26)$$

де 1 кВт·год. = 3600 кДж, а 3600 кДж / кВт·год : 29309 кДж / кг = 0,123 кг ум. пал. / кВт·год.

Під величиною  $b_T^c$  розуміють питому витрату умовного палива на виробіток електроенергії, тобто  $b_T^c$  (брутто).

В ідеальному випадку (при  $\eta_{к.с} = 1$  і  $\eta_{ем} = 1$ )  $b_T^c = 0,123$  кг ум.пал. / кВт·год.

В реальних умовах  $\eta_{к.с} < 1$ , через що  $b_T^c > 0,123$  кг ум.пал. /кВт·год.

Теплофікаційні турбіни ТЕЦ працюють з надходженням частини пари в конденсатор турбіни, або в конденсаційному режимі. При цьому виробляється електрична енергія в кількості  $E_{т.к.}$ , яку слід розглядати як суму двох складових:

$$E_{т.к.} = A + B, \quad (1.26 \text{ a})$$

де  $A$  – кількість електроенергії, виробленої парою, що надійшла в конденсатор, або власне конденсаційний виробіток електроенергії, кВт·год;

$B$  – кількість електроенергії, виробленої парою, що відбирається з турбіни в систему регенеративного нагрівання конденсату після конденсатора турбіни, який використовують як живильну воду, кВт·год.

При власне конденсаційному виробітку електроенергії питома

$$\text{витрата умовного палива дорівнює } \frac{0,123}{\eta_{к.с.} \cdot \eta_{ем} \cdot \eta_{іт}},$$

де  $\eta_{іт}$  – повний ККД конденсаційного циклу:

$$\eta_{іт} = \frac{H_T \eta_{вс}}{h_0 - h_{к.т}} \quad (1.27)$$

Питома витрата умовного палива для виробітку електроенергії при роботі турбіни в конденсаційному режимі визначиться з рівняння

$$b_{т.к.}^c = \frac{1}{A+B} \left( A \frac{0,123}{\eta_{к.с} \eta_{ем} \eta_{іт}} + B \frac{0,123}{\eta_{к.с} \eta_{ем}} \right), \quad (1.28)$$

Враховуючи, що  $\frac{B}{A} = e_{т.к.}$  – відносний теплофікаційний виробіток електроенергії на базі внутрішнього теплоспоживання при роботі турбіни в конденсаційному режимі, матимемо

$$b_{т,к}^e = \frac{0,123}{\eta_{к,с} \eta_{ем}} \left( \frac{1}{\eta_{ит}} + e_{т,к} \right) \frac{1}{(1 + e_{т,к})} = \frac{0,123}{\eta_{к,с} \eta_{ем} \eta_{ит}} \frac{(1 + e_{т,к} \eta_{ит})}{(1 + e_{т,к})} = \frac{0,123}{\eta_{к,с} \eta_{ем} \eta_{ит}^2} \quad (1.28a)$$

де  $\eta_{ит}^p$  – розрахунковий внутрішній ККД при роботі турбіни в конденсаційному режимі, який дорівнює:

$$\eta_{ит}^p = \eta_{ит} \cdot \frac{(1 + e_{т,к})}{(1 + e_{т,к} \eta_{ит})} \quad (1.29)$$

Середня питома витрата умовного палива на ТЕЦ з урахуванням як теплофікаційного, так і конденсаційного виробітку електричної енергії

$$b_{т,середн}^e = \frac{(b_{т}^e E_{т} + b_{т,к}^e E_{т,к})}{E} \quad (1.30)$$

Кількість теплоти  $Q$ , відпущеної з ТЕЦ, є сумою двох складових:

$$Q = Q_{т} + Q_{к} \quad (1.31)$$

де  $Q_{т}$  – теплота із відборів турбін;

$Q_{к}$  – теплота, відпущена безпосередньо із котлів.

Величина  $Q$  може бути визначена так:

$$Q = \frac{Q_a}{\eta_{т,м}} \quad (1.32)$$

де  $Q_a$  – теплота, віддана тепловим споживачам (абонентам);

$\eta_{т,м}$  – ККД теплової мережі, який враховує втрати теплоти в мережі,

$\eta_{т,м} = 0,9 \dots 0,95$ .

Витрата палива на виробіток теплоти на ТЕЦ

$$B_{т,т} = b_{т}^T Q = b_{т}^T \frac{Q_a}{\eta_{т,м}} \quad (1.33)$$

де  $b_{т}^T$  – питома витрата умовного палива на виробіток теплоти на ТЕЦ, кг ум.пал./ГДж., тобто кількість умовного палива, необхідного для виробітку 1ГДж теплоти, а саме:

$$b_T^r = \frac{1 \text{ ГДж}}{0,029 \text{ ГДж/кг} \cdot \eta_{к.с}} \quad (1.34)$$

де 0,029 ГДж/кг ум.пал. – теплота згоряння умовного палива.

Остаточна величина  $b_T^r$  визначиться як:

$$b_T^r = \frac{34,1}{\eta_{к.с}}, \frac{\text{кг ум.пал.}}{\text{ГДж}} \quad (1.35)$$

### 1.5. Визначення витрати палива при роздільному виробітку електричної енергії і теплоти

Витрата палива на роздільний виробіток теплоти і електричної енергії також є сумою двох складових:

$$B_p = B_{p.e} + B_{p.t} \quad (1.36)$$

де  $B_{p.e}$ ,  $B_{p.t}$  – витрата палива на виробіток відповідно електричної енергії на КЕС та теплоти для забезпечення споживачів у місцевих чи районних котельнях.

На сучасних КЕС з розвинутою регенерацією електрична енергія виробляється двома способами: конденсаційним і теплофікаційним на базі регенеративного підігрівання конденсату від температури  $T_{к.к}$  після конденсатора до  $T_{ж.в}$ .

На КЕС відсутній виробіток електроенергії на базі зовнішнього теплоспоживання. Якщо прийняти для КЕС умовну схему регенеративного підігрівання, розглянуту раніше, з тією різницею, що замість теплофікаційного підігрівника (установки) підключається конденсатор, то за аналогією можна записати для величини відносного виробітку електроенергії на базі внутрішнього споживання:

$$e_k = \frac{H_p h_{ж.в} - h_{к.к}}{H_k h_p - h_{ж.в}} \quad (1.37)$$

де  $H_x$  – адиабатний перепад від параметрів пари перед турбіною до тиску і температури пари в конденсаторі, кДж/кг;

$h_{к.к}$  – ентальпія конденсату після конденсатора КЕС, кДж/кг.

Середню питому витрату умовного палива для виробітку електроенергії на КЕС за аналогією з рівнянням (1.25) можна розрахувати за формулою

$$b_k^c = \frac{1}{\eta_{к.с} \eta_{е.м} \eta_{ік}^p} \quad (1.38)$$

де  $\eta_{ік}, \eta_{ік}^p$  — внутрішні абсолютні ККД конденсаційного виробітку на КЕС відповідно без урахування та з урахуванням регенерації:

$$\eta_{ік} = \frac{H_k \eta_{ві}}{(h_0 - h_{к.к})}; \quad (1.39)$$

$$\eta_{ік}^p = \eta_{ік} \frac{1 + e_k}{1 + e_k \eta_{ік}} \quad (1.40)$$

де  $h_0$  — ентальпія пари перед турбіною, кДж/кг.

Для виробітку на КЕС тієї самої кількості електроенергії, що і на ТЕЦ, треба витратити умовного палива, кг:

$$B_{p.e} = b_k^c E. \quad (1.41)$$

Витрата палива на виробіток теплоти при роздільній системі теплоенергопостачання по аналогії з (1.33) визначається за формулою:

$$B_{p.T} = b_k^T \cdot \frac{Q_a}{\eta_{мк}} \quad (1.42)$$

де  $b_k^T$  — питома витрата палива на виробіток теплоти в котельній;  
 $\eta_{мк}$  — ККД теплової мережі котельні, що дорівнює відношенню кількості теплоти, відданої споживачам, до кількості теплоти, що надходить у теплову мережу котельні;

$$\eta_{мк} = 0,92 \dots 0,96.$$

$$b_k^T = \frac{1}{\eta_k} \quad (1.43)$$

Якщо виразити величину  $b_k^T$  в кг ум.пал./ГДж, то:

$$b_k^T = \frac{34,1}{\eta_k} \quad (1.44)$$

де  $\eta_k$  – ККД котельні, який приймається для великих районних котельень  $\eta_k = 0,75 \dots 0,85$ ; для місцевих котельень  $\eta_k = 0,5 \dots 0,7$ .

### 1.6. Визначення абсолютної економії палива при теплофікації від паротурбінних ТЕЦ

Абсолютна економія палива при теплофікації порівняно з роздільним виробітком електроенергії на КЕС і теплоти в котельнях визначається як сума двох складових:

$$\Delta B_e = \Delta B_e + \Delta B_T \quad (1.45)$$

де  $\Delta B_e$  – різниця витрат умовного палива на КЕС і ТЕЦ на виробіток однієї й тієї самої кількості електричної енергії;

$\Delta B_T$  – різниця витрат умовного палива в котельнях і на ТЕЦ для теплопостачання однієї і тієї самої групи споживачів.

$\Delta B_T$  являє собою значну величину тільки при зіставленні централізованого теплопостачання від ТЕЦ з теплопостачанням від місцевих котельень. Різниця у витратах умовного палива на КЕС і ТЕЦ на виробіток однієї й тієї самої кількості електричної енергії визначається за формулою акад. Л.А. Мелентьєва [6]:

$$\Delta B_e = E_T (b_k^e - b_T^e) - E_{T,K} (b_{T,K}^e - b_k^e) \quad (1.46)$$

Перша складова – це економія палива, яку отримують на ТЕЦ завдяки теплофікаційному виробітку електричної енергії.

Друга складова являє собою перевитрату палива на ТЕЦ через виробіток на ній електричної енергії в конденсаційному режимі.

Як видно із рівняння (1.46), економія палива зростає зі зменшенням виробітку на ТЕЦ електричної енергії конденсаційним методом. З рівняння (1.46) визначається критична частка теплофікаційного виробітку електроенергії на базі теплофікації, для якої  $\Delta B_e = 0$ :

$$\bar{E}_T = \frac{(b_{T,K}^e - b_k^e)}{(b_{T,K}^e - b_T^e)} \quad (1.47)$$

де  $\bar{E}_\tau^*$  – відношення теплофікаційного виробітку електроенергії до повного виробітку електроенергії на ТЕЦ,

$$\bar{E}_\tau^* = \frac{E_\tau}{E}, \quad E = E_\tau + E_{\tau,к}.$$

Економію палива при виробітку електроенергії на ТЕЦ можна одержати лише за умови, що  $\bar{E}_\tau > \bar{E}_\tau^*$ .

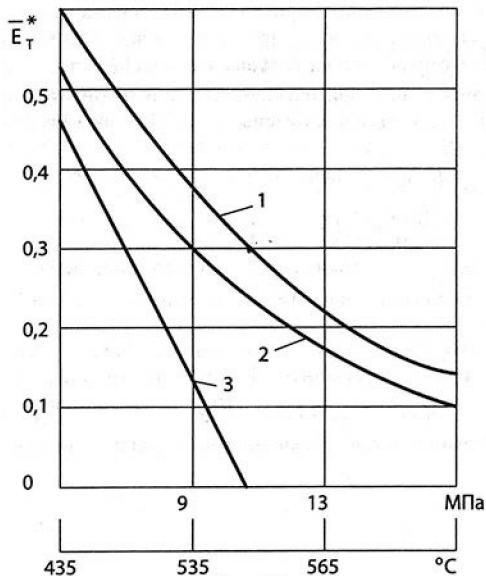


Рис. 1.4

На рис.1.4. наведені значення  $\bar{E}_\tau^*$ , залежно від параметрів пари після парогенераторів ТЕЦ і КЕС. Критична частка теплофікаційного виробітку електроенергії на ТЕЦ. Початкові параметри КЕС:

1 — 24 МПа, 560/565 °C; 2 — 13 МПа, 565 °C; 3 — 9 МПа, 535 °C. На осі абсцис — початкові параметри ТЕЦ

Підвищення початкових параметрів пари на ТЕЦ до рівня параметрів сучасних потужних КЕС суттєво збільшує економію палива  $\Delta B_e$ , оскільки при цьому разом зі зростанням теплофікаційного виробітку на базі теплового споживання  $E_T$  зменшується різниця питомих витрат палива на конденсаційний виробіток електроенергії на ТЕЦ і КЕС –  $(b_{Т.к}^e - b_k^e)$ .

Одночасно зменшується і значення величини  $E_T^*$ . Однак треба мати на увазі, що навіть при однакових початкових параметрах питома витрата палива на виробіток електроенергії в конденсаційному режимі на ТЕЦ вища, ніж на КЕС, тобто  $b_{Т.к}^e > b_k^e$ .

Економія палива при теплопостачанні однієї й тієї самої групи споживачів теплоти від котельні і від ТЕЦ визначається таким чином:

$$\Delta B_T = Q_s \left( \frac{b_k^T}{\eta_{МК}} - \frac{b_T^T}{\eta_{MT}} \right) \quad (1.48)$$

де  $\eta_{MT}$  – ККД теплової мережі ТЕЦ;

$\eta_{MT} < \eta_{МК}$ , оскільки радіус дії теплових мереж і район теплопостачання для ТЕЦ, як правило, більші, ніж для котельні.

Економія палива при централізованому теплопостачанні з ТЕЦ порівняно з теплопостачанням від котельні має місце лише тоді, коли  $\eta_{MT} \cdot \eta_{КС} / \eta_{МК} \eta_K > 1$ . ККД котельні ТЕЦ  $\eta_{КС}$ , як правило, більший, ніж ККД районних чи місцевих котельні  $\eta_K$ .

### *Запитання для самоперевірки*

- 1) У чому полягають основні переваги теплофікаційного виробітку теплової і електричної енергії ?
- 2) Чому теплофікація є вищою формою централізованого теплопостачання ?
- 3) Якими є методи оцінки енергетичної ефективності теплофікації?
- 4) Які чинники визначають економічність теплофікації?
- 5) Як визначається повний теплофікаційний виробіток електроенергії на ТЕЦ?
- 6) Як визначається: а) витрата палива при роздільному виробітку електричної енергії і теплоти; б) абсолютна економія палива при теплофікації; в) питома економія палива при теплофікації?
- 7) Що таке критична частка теплофікаційного виробітку електроенергії на ТЕЦ?