

ЛЕКЦІЯ 3

ЕКОНОМІЯ ПАЛИВА НА ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

Мета лекції – ознайомитися із загальними тенденціями споживання палива та засвоїти підходи оцінки питомих витрат палива на ТЕС та заходів щодо їх зменшення.

3.1. Загальні тенденції споживання палива

Відповідно до ДСТУ 3440-96 під енергетикою слід розуміти галузь господарства, науки і техніки, що охоплює енергетичні ресурси, виробництво, передачу, перетворення, акумуляцію, розподіл і споживання різних видів енергії. Основою виробництва електроенергії є первинна енергія, яка запасена у паливно-енергетичних ресурсах.

Залежно від споживаного виду палива, його складу, якості та характеристик створюються відповідні енергоустановки і вся пов'язана з ними інфраструктура, що включає транспорт, переробку, зберігання або захоронення відходів і багато чого іншого. Таким чином, техніка і технологія виробництва енергії залежить від енергетичних ресурсів. При цьому основні проблеми їх ефективного використання виникають саме на етапі виробництва енергії. Етапи, що включають передачу, перетворення, акумуляцію, розподіл і споживання енергії, розглянуті краще.

Декілька століть практично єдиним енергоносієм у світі було вугілля. Залишалося воно основним і для ТЕС України на початку XXI століття. За прогнозами фахівців багатьох країн, світові запаси вугілля за енергетичним еквівалентом у 5 разів перевищують запаси нафти і газу. Згідно з даними Світового вугільного інституту, який є некомерційною неурядовою асоціацією світових виробників і споживачів вугілля шести континентів, на частку вугілля припадає 90 % енергетичного потенціалу всіх придатних для розробки корисних копалин органічного походження. У США, наприклад, вважають, що у них вугілля вистачить на 1000 років, в Росії – на 700. За оцінками західних експертів, світова потреба у вугіллі до 2010 – 2015 рр. може зрости у 2 рази, і воно стане основним енергоносієм на всю перспективу XXI століття.

Державна політика передових промислово розвинених країн спрямована зараз на збільшення обсягів видобутку вугілля. Якщо виходити з потреби, яка на 2010 рік складала 110 млн т (програма "Українське вугілля"), і врахувати 40 % експлуатаційних втрат, то розвіданих запасів нашої країни вистачить майже на 300 років.

Значні резерви в енергозабезпеченні України полягають у використанні низькокалорійних видів палива:

- бурого вугілля, запаси якого складають більше 8 млрд т, з них значна частина може розроблятися безпечно відкритим способом;
- торфу як місцевого палива для регіонів, де відсутні інші види органічної сировини, а запаси його перевищують 2 млрд тонн.

Слід розвивати прогресивні, високоефективні й екологічно чисті технології спалювання некондиційного високозольного вугілля і відходів вуглезабагачення у топках з ЦКШ, які в умовах Донбасу можуть бути базою для малої енергетики. У світі за такою технологією працюють більше 300 електростанцій. За даними УкрНДІвуглезабагачення, тільки у мулонакопичувачах збагачувальних фабрик знаходиться більше 115 млн тонн відходів із вмістом горючої складової від 30 до 80 %.

Використання метану, що виділяється під час видобутку вугілля, – одна з найважливіших проблем в економіці й екології вуглевидобувних регіонів. Застосування цього газу як палива зменшить його викид в атмосферу та відповідно знизить згубний вплив на озоновий щит планети. За оцінками УкрНДІпроект, вміст метану у вугленосних відкладеннях України складає 25 – 30 трлн м³. Однак слід зазначити, що практично у всьому світі виробництво електроенергії при спалюванні вугілля на 40 – 45 % економічніше, ніж природного газу.

3.2. Використання палива на вугільних ТЕС

Показником ефективної роботи електростанцій є річне число годин їх використання для виробництва електроенергії:

$$t_p = W/P_e,$$

де W – виробництво електроенергії, млн кВт·год; P_e – потужність, яка задіяна під час виробництва електроенергії, ГВт.

Мале значення величини t_p для ГЕС пояснюється обмеженими гідроресурсами і роботою цих станцій у маневреному режимі.

Коефіцієнт використання встановленої потужності ТЕС, які задіяні у виробництві електроенергії, станом на 2010 р. складає 40 % проти 68 % у 1990 р., а планується досягти його значення 53 % у 2030 р. Низьке використання встановленої потужності ТЕС обґрунтовано даними технічної експертизи енергоблоків.

Таким чином, обсяг палива залежить від часу використання потужності електростанції та, безумовно, ефективності його спалювання. Критерієм використання палива є його питомі витрати на виробництво 1 кВт·год електроенергії.

Отже, витрата палива на ТЕС залежить від його характеристики і технології спалювання, технічного стану обладнання, визначуваного ККД енергоблоку $\eta_{еб}$ і ТЕС взагалі $\eta_{ТЕС}$, а також величини коефіцієнта нерівномірності графіка споживання енергії α_n .

У літературі показники, що характеризують витрати палива, зазвичай відповідають усередненим за рік або якийсь інший період часу значенням без урахування тимчасових або сезонних чинників. Більш детальні дані стосовно окремих енергоблоків різних ТЕС викладені у галузевих звітних матеріалах.

Розглянемо основні причини та чинники, що впливають на витрати палива на ТЕС.

Газоподібне, рідке і тверде паливо характеризується елементарним складом горючої маси і баласту. Склад твердого і рідкого палива виражають у відсотках за масою, а газоподібного – у відсотках до загального обсягу. Для твердого палива залежно від складу розрізняють робочі, аналітичні, сухі, горючі та органічні маси. Перерахунок складу палива з однієї маси на іншу виконують за допомогою множників відповідно до ДСТУ 3581–8 (ГОСТ 30517–97).

Теплота згорання палива – це тепло, яке виділяється при повному згоранні 1 кг твердого (рідкого) або 1 м³ газоподібного палива за нормальних умов. Розрізняють дві теплотворні здатності палива за умовою врахування вмісту в ньому вологи: вищу і нижчу, що можуть бути визначені за формулою Д.І. Менделєєва відповідно до елементного складу палива.

Теплота згорання для різних видів палива коливається у широких межах, а її значення для деяких видів палива і речовин наведені у дод. Б. Для порівняння енергетичної цінності палива введено поняття умовного палива, теплотворна здатність робочої маси якого прийнята 29,3 МДж/кг або 7000 ккал/кг. Відношення теплоти згорання натурального палива до теплоти згорання умовного палива називають тепловим еквівалентом, тобто $E_m = Q_n^p / 29,3$, значення якого може бути більше або менше одиниці. Перерахунок маси натурального палива в умовне виконують шляхом множення його кількості на тепловий еквівалент. Наприклад, $Q_{ум} = Q_{нат} E_m$, де $Q_{ум}$, $Q_{нат}$ – теплота згорання відповідно умовного і натурального палива.

На практиці ефективність використання палива оцінюють ККД:

$$\eta_{en} = Q_{0m} / Q_{0ф}, \quad (3.1)$$

де Q_{0m} – теоретичний вміст теплоти в одиниці електроенергії (1 кВт·год = 3,6 МДж); $Q_{0ф}$ – фактичний обсяг теплоти, необхідний для виробництва 1 кВт·год електроенергії, що визначається за фактичною питомою витратою палива.

Величина ККД використання палива залежить також від ступеня зношеності устаткування ТЕС і якості палива, технологій спалювання й умов експлуатації технологічного обладнання.

Величина ККД ТЕС відрізняється від ККД використання палива пропорційно частці енергії, що витрачається на власні потреби електростанції: підготовку палива та води, транспортні, технологічні витрати на передачу різних видів сировини і речовин, вентиляцію, кондиціонування, окислювальні процеси тощо. На власні потреби ТЕС витрачається від 5 до 15 % палива, залежно від його виду та технології генерації енергії.

Загалом ККД ТЕС можна визначити за залежністю, що враховує витрату енергії на власні потреби:

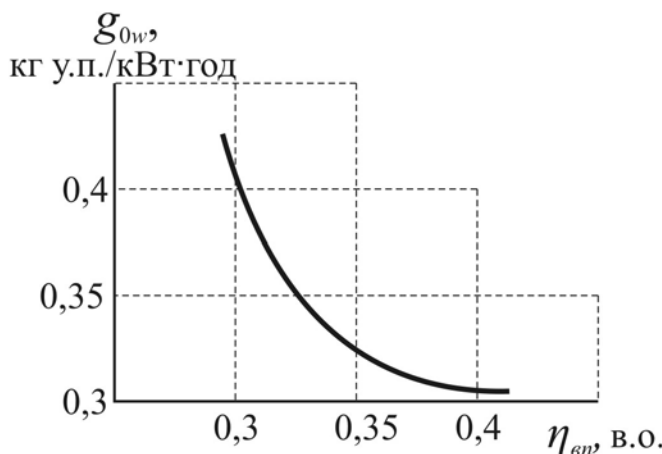
$$\eta_{TEC} = \frac{Q_{0m}}{Q_{0\phi} + Q_{0ен}} = \frac{Q_{0m}}{Q_{0\phi} (1 + Q_{ен}^{б.о.})}, \quad (3.2)$$

де $Q_{0ен}$ – кількість теплоти, що витрачається на власні потреби ТЕС для виробництва 1 кВт·год електроенергії, МДж; $Q_{ен}^{б.о.}$ – відносна кількість теплоти, що витрачається на власні потреби ТЕС.

Перетворимо співвідношення (3.1), де замість $Q_{0\phi}$ підставимо теплотворну здатність умовного палива $Q_{yn} = 29,3$ МДж/кг, і визначимо його питому витрату на 1 кВт·год електроенергії, тобто

$$g_{0w} = \frac{Q_{0m}}{Q_{yn} \eta_{ен}}. \quad (3.3)$$

За формулою (3.3) для діапазону значень $\eta_{ен}$ від 0,3 до 0,4 розрахуємо питому витрату умовного палива, величина яких суттєво залежить від ККД його використання (рис. 3.1).



Виходячи з балансу електричної енергії (див. табл. 1.3) Енергостратегією-2012 передбачається збільшення видобутку вугілля до 115 млн т на рік з одночасним виведенням галузі на рівень беззбитковості. Енергетичного вугілля видобуватимуть близько 75 млн т, що достатньо для повного забезпечення внутрішнього попиту на електроенергію (табл. 3.1).

Рис. 3.1. Питомі витрати умовного палива

Таблиця 3.1

Баланс вугілля згідно з Енергостратегією-2012 (млн т)

Стаття балансу	2010	Прогноз за роками			
	(факт.)	2015	2020	2025	2030
Прибуткова частина					
1. Видобуток рядового вугілля, всього, у тому числі:	75	83,5	92,8	103,3	115
- для коксування	24	27,3	31	35,2	40
- енергетичного	51	56,2	61,8	68,1	75
з нього готового :	54,8	62,6	71,5	81,6	93,2
- для коксування	17,5	20,5	23,9	27,8	32,4
- енергетичного	37,2	42,2	47,6	53,8	60,8
2. Імпорт	12,1	7,6	7,6	7,0	6,5
Витратна частина					

1. Споживання вугілля нетто	59,6	67,1	66,6	70,9	76,0
2. Втрати при транспортуванні, зберіганні та розподілі	1,9	2,1	1,8	1,8	1,6
3. Експорт вугілля	6,2	1,5	10,2	14,4	20,5

Попит на енергетичне вугілля на 90 % формується за рахунок енергетичних компаній. До інших споживачів належать металургійні підприємства (4 %), населення (3 %), а також інші сектори (3 %) – виробники цементу, содові й цукрові заводи, гірничо-збагачувальні комбінати, залізнична галузь тощо.

Прогноз попиту на енергетичне вугілля з боку енергетики визначається двома чинниками. По-перше, збільшиться потреба в електроенергії, і, як наслідок, обсяги її виробництва вугільними ТЕС (з 68 у 2010 р. до 92 млрд кВт·год у 2030 р. – див. п. 1.3). По-друге, підвищиться ефективність станцій, що сприятиме зниженню питомої витрати палива (з 396 у 2010 р. до 347 г у.п./кВт·год у 2030 р. – див. п. 2.3) за рахунок модернізації діючих і будівництва нових станцій.

Відповідно до базового сценарію Енергостратегії-2012 споживання природного газу на потреби електроенергетики у 2030 р. залишиться практично незмінним і складе 2 млрд м³. Основними споживачами газу залишаться ТЕЦ і блок–станції, на яких газ використовується як основний вид палива, а також вугільні блоки ТЕС, на яких газ використовується для запуску та "підсвічування" низькоякісного вугільного палива. При цьому питоме споживання газу на таких ТЕС буде настільки малим, що навіть збільшення ними виробництва електроенергії на 50 % не викличе значного зростання споживання газу. Газові блоки ТЕС у 2030 р. використовуватися не будуть через їх низьку економічну ефективність при високій ціні на газ.

3.3. Вплив якості палива на обсяги його використання

Питання якості вугілля є одним з головних, оскільки збільшення кількості палива при зниженні його калорійності не завжди призводить до зростання обсягів виробництва тепла й електроенергії.

Для загальної оцінки фактичного коефіцієнта енергетичного використання палива (3.1) можна скористатися залежністю

$$\eta_{en}^{\phi} = \eta_{e\phi} - bA_g^d, \% \quad (3.4)$$

де b – коефіцієнт технічного стану енергоблоку, в.о.; A_g^d – зольність вугілля, %.

Коефіцієнт b змінюється у межах від 0,1 (добрий стан енергоблоку) до 0,3 і більше, а значення зольності від 15 до 40–45 %.

Приклад 3.1. Порівняти фактичний коефіцієнт використання палива η_{en}^{ϕ} новітніх ТЕС з $\eta_{e\phi} = 45$ %, добрим технічним станом енергоблоку ($b = 0,1$) і не-

великою зольністю вугілля ($A_g^d = 15\%$) та ТЕС України, в яких $\eta_{eб} = 40\%$, $b = 0,2$ і $A_g^d = 35\%$.

Розв'язування. Згідно із залежністю (3.4) для новітніх ТЕС

$$\eta_{ен}^{\phi 1} = 45 - 0,1 \cdot 15 = 43,5\%,$$

що практично відповідає прогресивному значенню для сучасних умов.

Для ТЕС України

$$\eta_{ен}^{\phi 2} = 40 - 0,2 \cdot 35 = 33,0\%,$$

що на 10% менше за значення для новітніх типів установок генерації енергії.

Отже, залежність (3.4) свідчить, що для підвищення енергетичної ефективності використання палива необхідно поліпшувати технічний стан енергоблоку, знижуючи значення b до нуля, і підвищувати якість палива, зменшуючи його зольність. Примітно, що для котлів з ЦКШ значення b практично дорівнює нулю.

Вимоги, що ставляться до якості вугілля, визначаються технологією його спалювання. В електроенергетиці найбільш поширене спалювання в топках заздалегідь підсушеного і подрібненого до розміру частинки вугілля 0,1 мм у суспензованому стані.

Згорання пиловугільного факела у потоці, в якому досягається висока ефективність окислення, обумовлена площею поверхні для реакції подрібненого палива з киснем. Багаторічний досвід використання такої технології виявив її економічну перевагу. У той самий час при очевидних перевагах пилове спалювання має і недоліки – значні витрати електроенергії та збільшення капітальних витрат на подрібнення і пневмотранспорт палива.

Для забезпечення якості вугілля при пилоподібному спалюванні найбільше значення має нижча теплота згорання робочого палива. Цей показник є інтегральною властивістю якості вугілля і визначається такими його параметрами, як зольність, вологість та найвища питома теплота згорання горючої маси палива. Вплив зольності на економічну ефективність вугільних ТЕС виявляється також у підвищенні витрат на підготовку палива внаслідок погіршення якості розмеленості вугілля через більшу частину в ньому породи.

Визначення корисного тепла

При спалюванні будь-якої маси вугілля може бути отримано корисне тепло. Так, для рядового вугілля

$$Q_в = G_в \left(Q_в^m \frac{100 - A_в^d - B_в}{100} - 0,025 B_в \right) \eta_{ен}, \quad (3.5)$$

а збагаченого (концентрату)

$$Q_к = \frac{m_к}{100} G_в \left(Q_в^m \frac{100 - A_к^d - B_к}{100} - 0,025 B_к \right) \eta_{ен}, \quad (3.6)$$

де $G_в$, $m_к$ – маса вугілля (т) і концентрату (%) відповідно; $Q_в^m$ – теплота згорання вугілля, МДж/кг; $B_в$, $B_к$ – вологість вугілля та концентрату відповідно, %; $A_к^d$ – зольність концентрату, %.

Вихід маси концентрату $m_к$ з маси рядового вугілля $G_в$ визначається за такою формулою:

$$m_к = \frac{A_n^d - A_в^d}{A_n^d - A_к^d} 100, \quad (3.7)$$

де A_n^d – зольність породи, %.

Приклад 3.2. Перевірити енергетичну доцільність збагачення вугілля при таких даних: для рядового вугілля $A_в^d = 35$ %, $B_в = 10$ %, $Q_в^m = 25,1$ МДж/кг, маса вугілля $G_в = 1000$ кг, $\eta_{ен} = 32,6$ %; для концентрату $A_к^d = 15$ %, $B_к = 7$ %, $\eta_{ен} = 36,6$ %, зольність породи $A_n^d = 80$ %.

Розв'язування. За формулою (3.7) визначимо масу концентрату

$$m_к = \frac{80 - 35}{80 - 15} 100 = 69,2 \text{ \%}.$$

Далі за виразами (3.5) і (3.6) розрахуємо корисне тепло рядового вугілля і концентрату:

$$Q_в = 1000 \left(25,1 \frac{100 - 35 - 10}{100} - 0,025 \cdot 10 \right) \cdot 0,326 = 4419 \text{ МДж};$$

$$Q_к = \frac{69,2}{100} \cdot 1000 \left(25,1 \frac{100 - 15 - 7}{100} - 0,025 \cdot 7 \right) \cdot 0,366 = 4914 \text{ МДж}.$$

Висновки. Використання концентрату для виробництва енергії дозволяє одержати з тони рядового вугілля додатково 495 МДж тепла, що складає 11,2 % від обсягу, отриманого з вихідного продукту. Обсяг палива, що перевозиться, зменшується на 308 кг, тобто майже на 30 %.

Таким чином, у результаті використання на ТЕС замість рядового вугілля збагаченого можна отримати економію палива і зменшити витрати на його доставку, але при цьому слід ураховувати витрати енергії та коштів на збагачення вугілля та його транспортування.

Урахування втрат вугілля

При використанні на ТЕС вугілля із зольністю, що перевищує проектну, системи пилоприготування не забезпечують належного навантаження на котлоагрегати. У найпоширеніших котлоагрегатах з рідким видаленням шлаку порушуються умови цього процесу аж до повного зашлаковування обладнання. Тепловий баланс зони активного горіння зсувається у бік більш низьких температур, що призводить до збільшення механічного недопалювання горючої части-

ни вугілля, а потім до загасання факела. Застосування для підтримки навантаження, а також для умов горіння і шлаковидалення газомазутового "підсвічування" (до 20 % по теплу для високозольного кам'яного вугілля і до 40 % – для антрациту) призводить до невиправдано високих витрат імпортуємого природного газу.

При сумісному спалюванні вугілля з газом або мазутом зберігається високий рівень механічного недопалювання (значення коефіцієнта втрат K_g сягає 20 %), що при існуючій зношеності котлоагрегатів знижує ККД енергоблоків з 36 до 28 – 29 % і відповідно збільшує дефіцит енергоресурсів (рис. 3.2).

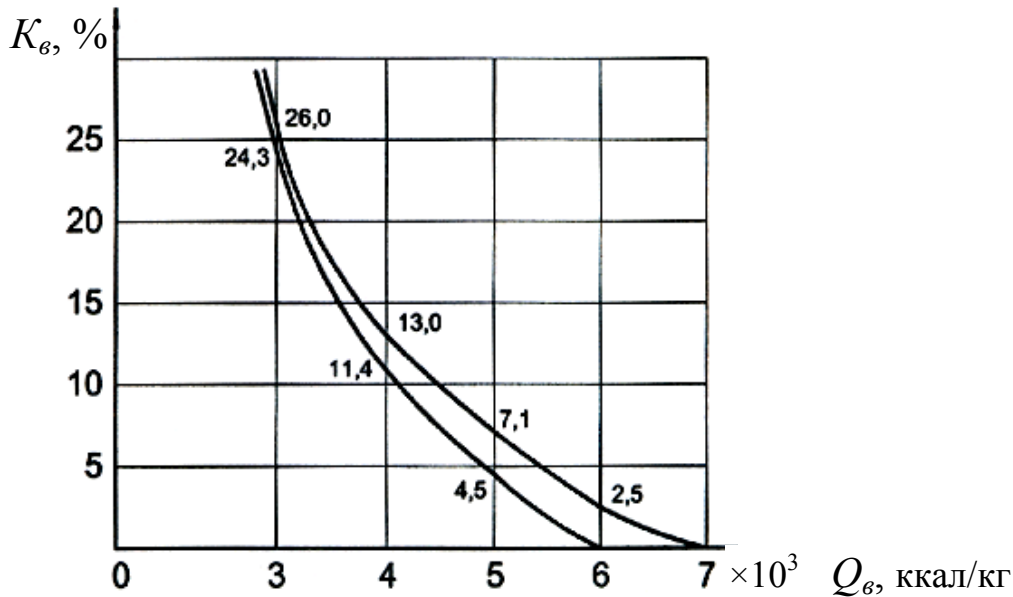


Рис. 3.2. Криві коефіцієнта втрат вугілля K_g при застосуванні газу (мазуту) для активізації процесу спалення

Обсяг газу (мазуту) при різних значеннях теплоти згорання палива можна визначити так:

$$Q_p g_{0p} = Q_g g_{0g} \left(\frac{100 - K_g}{100} \right) + Q_z g_{0z}, \quad (3.8)$$

де Q_g, Q_z, Q_p – відповідно теплота згорання наявного вугілля, газу (мазуту) і натурального палива, регламентованого для даної конкретної ТЕС або котлоагрегату; g_{0p}, g_{0g}, g_{0z} – питома витрата відповідного виду палива (регламентованого, вугілля, газу (мазуту)); K_g – коефіцієнт втрат вугілля (визначається за рис. 3.2).

З рівняння (3.8) одержуємо питомі витрати газу (мазуту) як додаткового палива до вугілля на виробництво 1 кВт·год енергії:

$$g_{0z} = \frac{Q_p g_{0p} - Q_e g_{0e} \left(\frac{100 - K_e}{100} \right)}{Q_z} \quad (3.9)$$

У сучасній літературі, особливо зарубіжній, можна зустріти різні одиниці виміру кількості палива та енергії. Наприклад, у Німеччині одиниця виміру – умовне кам'яновугільне паливо, 1 т якого дорівнює 8130 кВт·год. У деяких публікаціях згадується британська тепла одиниця, об'єм природного газу може вимірюватися у кубічних футах. На допомогу користувачу в дод. В наведені основні співвідношення між одиницями виміру енергії та механізм їх перетворення.

Приклад 3.3. Теплова електростанція виробляє за рік $W_p = 6$ млрд кВт·год електроенергії при регламентованій теплоті згорання вугілля $Q_p = 27,6$ МДж/кг або 6600 ккал/кг. Теплота згорання натурального палива (вугілля), що поставляється на ТЕС, $Q_e = 23,0$ МДж/кг або 5500 ккал/кг. Для "підсвічування" використовується природний газ з теплотворною здатністю $Q_z = 33,08$ МДж/м³ та густиною $\rho = 0,723$ кг/м³. Визначити річну витрату газу G_z для виробництва електроенергії при ККД використання палива $\eta_{en} = 0,35$.

Розв'язування. Питома витрата вугілля, що поставляється на ТЕС:

$$g_{0e} = \frac{Q_{0m}}{\eta_{en} Q_e} = \frac{3,6}{0,35 \cdot 23} = 0,447 \text{ кг/кВт·год.}$$

Питома витрата регламентованого вугілля

$$g_{0p} = \frac{Q_{0m}}{\eta_{en} Q_p} = \frac{3,6}{0,35 \cdot 27,6} = 0,373 \text{ кг/кВт·год.}$$

За допомогою рис. 3.2 для кривої $Q_p = 27,6$ МДж/кг (6600 ккал/кг) у точці перетину її з прямою $Q_e = 23,0$ МДж/кг (5500 ккал/кг) отримаємо значення коефіцієнта втрат вугілля $K_e = 4,5$ %.

За виразом (3.9) визначимо питому витрату газу, використовуючи його теплоту згорання для маси $Q_z = 33,08/0,723 = 45,75$ МДж/кг:

$$g_{0z} = \frac{27,6 \cdot 0,373 - 23 \cdot 0,447 \left(\frac{100 - 4,5}{100} \right)}{45,75} = 0,01043 \text{ кг/кВт·год.}$$

Враховуючи густину газу $\rho = 0,723$ кг/м³ його питома витрата складе 0,0144 м³/кг. Тоді річна витрата газу для "підсвічування"

$$G_z = g_{0z} W_p = 0,0144 \cdot 6 \cdot 10^9 = 86,4 \text{ млн м}^3,$$

що дорівнює 4,3 % від передбаченого Енергостратегією-2012 об'єму 2 млрд м³. На практиці газу для вказаної мети витрачають менше. Наприклад, із розрахункових 86,4 млн м³ можуть витратити тільки 25–30 млн м³, але у цьому разі необхідно зробити перерахунок теплових режимів палива.

Криві, що свідчать про значну залежність величини питомих витрат палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії g_{0w} до зміни ККД його використання $\eta_{ен}$ і теплоти згорання натурального палива $Q_{ун}$, наведені на рис. 3.3. Як бачимо, при використанні палива з теплою згорання, нижчою за регламентовану (паспортну) для енергоблоку ТЕС (величиною 27,6 МДж/кг), питомі витрати зростають за рахунок "підсвічування" і втрат вугілля при спалюванні.

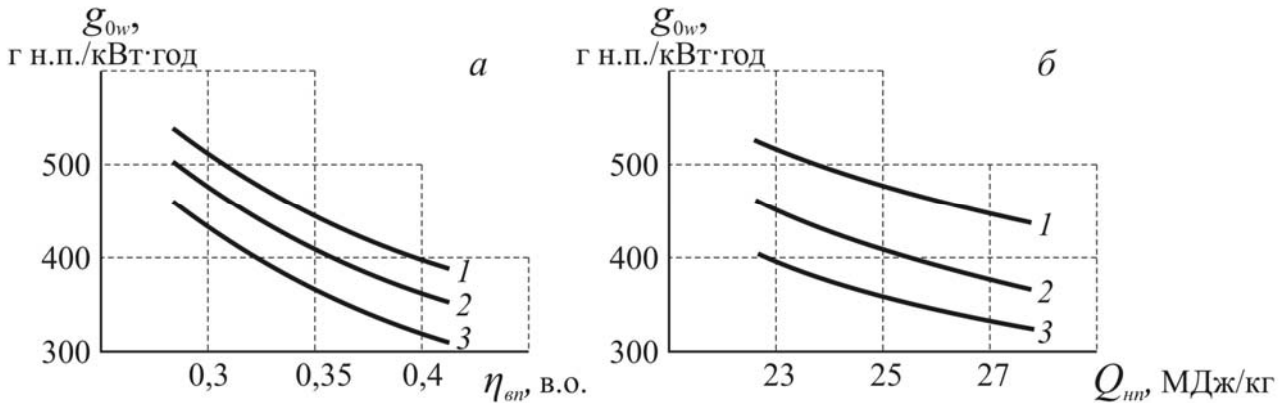


Рис. 3.3. Залежності питомих витрат палива: а – $g_{0w} = f(\eta_{ен})$ при $Q_{ун} = 23$ (1), 25 (2) і 27,6 МДж/кг (3); б – $g_{0w} = f(Q_{ун})$ при $\eta_{ен} = 0,3$ (1), 0,35 (2) і 0,4 (3)

3.4. Вплив нерівномірності електроспоживання на питомі витрати палива

На практиці питомі витрати умовного палива g_0 розраховуються за фактичними даними обсягу виробленої електроенергії W та загальними витратами палива G шляхом ділення G на W . Однак такі розрахунки не пояснюють, з яких складових складаються витрати умовного палива.

Загальний вигляд залежності питомих витрат палива такий:

$$g_0 = g_{0w} + g_{0н}, \quad (3.10)$$

де g_{0w} – питома витрата умовного палива на виробництво електроенергії при рівномірному ГЕН; $g_{0н}$ – додаткова питома витрата умовного палива на виробництво електроенергії для покриття (забезпечення) нерівномірної частини ГЕН.

Адекватні моделі для оцінки впливу нерівномірності електроспоживання на питомі витрати палива можна отримати шляхом фізичного обґрунтування.

При зміні навантаження на ΔP протягом часу $t_1 - t_2$ величина витрати палива змінюється за такою залежністю:

$$\Delta G = \int_{t_1}^{t_2} \varphi \Delta P(t) dt, \quad (3.11)$$

де φ – відносний приріст витрати палива – перша похідна витрати палива за навантаженням або збільшення витрати палива при зміні навантаження на одиницю. При переводі ТЕС із базового режиму роботи у напівпіковий та далі в піковий (рис. 3.4) потужність станції збільшується і відповідно витрачається більше палива для забезпечення підвищеного навантаження.

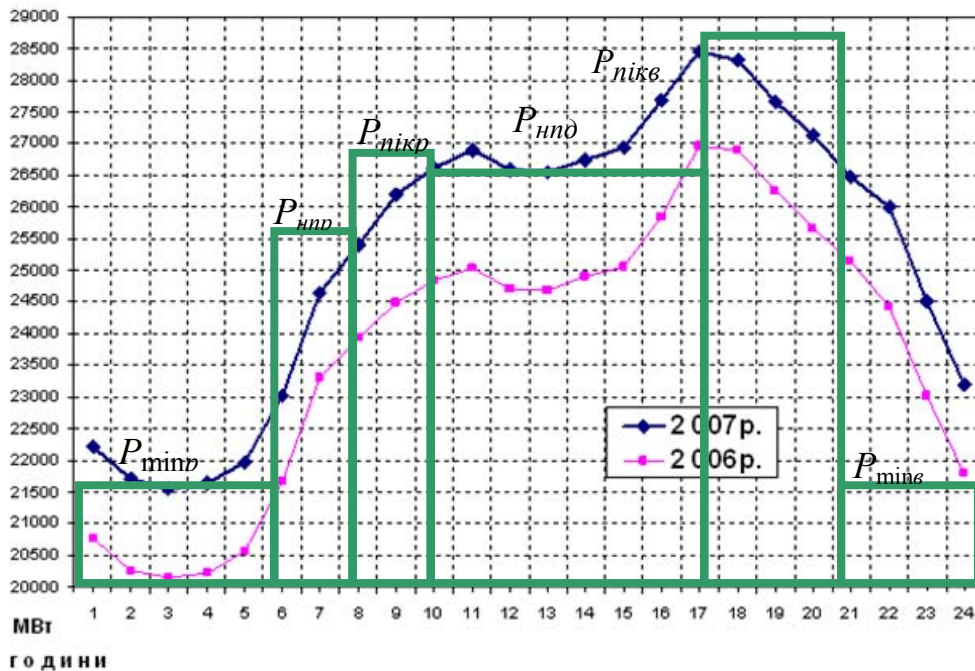


Рис. 3.4. Добовий ГЕН енергетичної системи України за грудень 2006 та 2007 років згідно з робочими днями

Узагальнюючи дані приросту потужності в періоди максимальних і мінімальних електричних навантажень, питомих витрат палива на один пуск енергоблоку та їх кількість, ефективності використання палива за тарифними зонами, питомих витрат палива на холостому ході, були отримані показники для оцінки енергоефективності, що відповідають умовам залежності (3.11).

Розглянемо першу складову g_{0w} залежності (3.10). Із фізики відомо, що теоретична кількість теплової енергії, яка міститься у 1 кВт·год, $Q_w = 3,6$ МДж, а теплота згорання умовного палива $Q_{yn} = 29,3$ МДж/кг. Тоді, поділивши 3,6 на 29,3, отримаємо теоретичну кількість умовного палива для виробництва 1 кВт·год енергії ($g_{0m} = 0,12287$ кг у.п./кВт·год). Фактична кількість умовного палива при рівномірному ГЕН $g_{0w} = g_{0m} / k_{nn}$, де k_{nn} – коефіцієнт перетворення палива, який залежить від технічного стану енергоблоку та його ККД, якості палива тощо. З урахуванням усіх складових значення k_{nn} знаходиться в межах 0,3 – 0,45. Тоді $g_{0w} = 0,4 – 0,27$ кг у.п./кВт·год.

Друга складова g_{0n} залежності (3.10) з'являється у разі нерівномірності ГЕН. Враховуючи залежність (3.11), по суті необхідно отримати відносний приріст витрати палива у вигляді коефіцієнта, що відображає характер зміни ГЕН (див. рис. 3.4).

Графіки електричних навантажень описуються різними показниками. Нерівномірність графіка у часі характеризує коефіцієнт форми. Своє найменше значення, тобто одиницю, він приймає при рівномірному у часі навантаженні. У роботі [13] доведено, що залежність коефіцієнта форми від коефіцієнта нерівномірності ГЕН α має такий вигляд: $K_\phi = \frac{1 + \alpha}{2\sqrt{\alpha}}$.

Оскільки коефіцієнт нерівномірності відображає нестабільність усього ГЕН, а зміна величини потужності відбувається декілька разів на добу, то вводимо поняття середньозваженого коефіцієнта нерівномірності електричного навантаження α_Σ . Він являє собою середньоарифметичне від коефіцієнтів нерівномірності в періоди ранкового напівпіка, ранкового піка, денного напівпіка й вечірнього піка, тобто у часи підвищення навантаження (рис. 3.4).

Таким чином, у формулу для визначення питомої витрати умовного палива вводимо другий доданок, чутливий до змін електричного навантаження:

$$g_{0n} = \frac{g_{0m}}{k_{nn}} (K_\phi - \alpha_\Sigma) = \frac{0,12287}{k_{nn}} (K_\phi - \alpha_\Sigma).$$

Для отримання α_Σ треба мати фактичні ГЕН, проте в статистичних даних найчастіше можна знайти значення просто α . Тому було проаналізовано понад 100 графіків електричних навантажень різних енергетичних систем за 2007 рік та за допомогою методу найменших квадратів одержане рівняння $\alpha_\Sigma = 0,415981\alpha + 0,5843$. Далі встановлена загальна залежність питомих витрат умовного палива з урахуванням нерівномірності ГЕН:

$$\begin{aligned} g_0 &= g_{0w} + g_{0n} = \frac{0,12287}{k_{nn}} + \frac{0,12287}{k_{nn}} (K_\phi - 0,416\alpha - 0,584) = \\ &= \frac{0,12287}{k_{nn}} \left[1 + \left(\frac{1 + \alpha}{2\sqrt{\alpha}} - 0,416\alpha - 0,584 \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Залежність питомих витрат умовного палива від нерівномірності електроспоживання дозволяє коректно оцінювати її вплив на загальну та питому витрати палива, а також його вартість при виконанні техніко-економічних розрахунків РРЕ. Крім того, залежність враховує якісні характеристики процесу використання вугілля та дозволяє аналізувати добові, тижневі, місячні або річні ГЕН.

При використанні залежності (3.12) у разі коефіцієнта нерівномірності $\alpha = 1$ друга складова перетворюється в нуль, що свідчить про рівномірність графіка електроспоживання. Також вона матиме відповідні значення при $\alpha < 1$. Як показують розрахунки, сумарні питомі витрати палива g_0 будуть зростати при зменшенні величини α (збільшенні нерівномірності електроспоживання, див. рис. 3.5).

За узагальненими даними найбільша нерівномірність ГЕН спостерігається у зимовий період при $\alpha = 0,74-0,76$, що викликає додаткову питому витрату

умовного палива близько 50 г у.п./кВт·год. Найкращі показники нерівномірності електроспоживання спостерігаються влітку, коли $\alpha = 0,88-0,95$. Наприклад, при $\alpha = 0,9$ і дуже високому коефіцієнті $k_{nn} = 0,4$ додаткова питома витрата палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії складе лише 13 г. Для натурального вугілля з теплою згорання $Q_{nn} = 25$ МДж/кг цей показник буде такий:

$$g_{0nn} = 13 \frac{29,3}{25} = 15,2 \text{ г/кВт·год.}$$

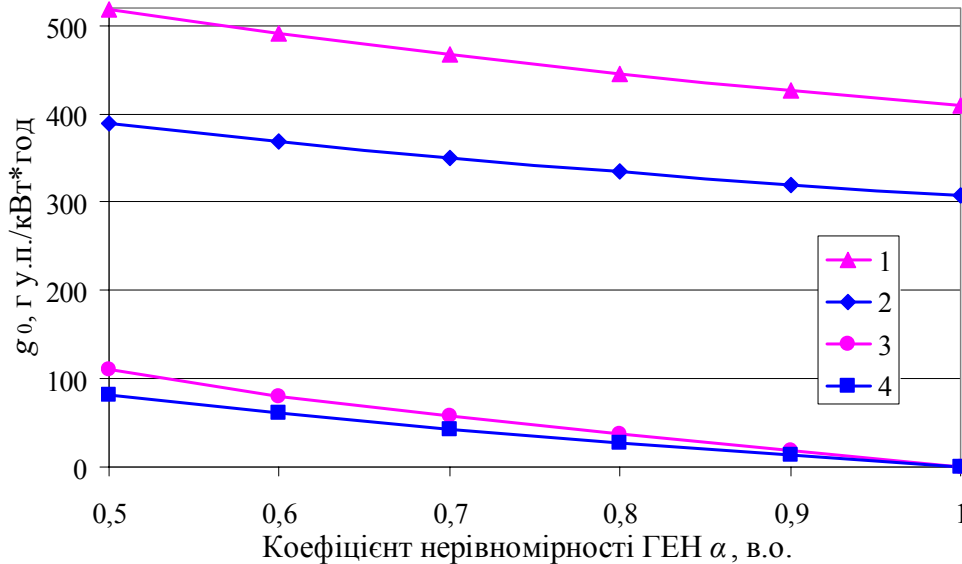


Рис. 3.5. Графіки залежності загальних g_0 та додаткових g_{0n} питомих витрат умовного палива від коефіцієнта α при $k_{nn} = 0,3$ (відповідно криві 1 і 3) та $0,4$ (відповідно криві 2 і 4)

Приклад 3.4. Коефіцієнт нерівномірності ГЕН α у вузлі електричного навантаження зріс із 0,8 до 0,9. Коефіцієнт перетворення палива для енергоблоку, що працює на покриття пікового навантаження, $k_{nn} = 35\%$. Визначити всі складові питомих витрат натурального палива з теплою згорання $Q_{nn1} = 27,6$ МДж/кг і $Q_{nn2} = 23,0$ МДж/кг для граничних значень α .

Розв'язування. За залежностями (3.3) і (3.12) з урахуванням використання натурального палива (вугілля) і показників нерівномірності графіка навантаження визначаємо усі складові питомих витрат палива (див. таблицю). Наприклад, складова при рівномірному ГЕН:

- для палива з $Q_{nn1} = 27,6$ МДж/кг $g_{0w} = \frac{3,6}{27,6 \cdot 0,35} = 0,373$ кг/кВт·год;

- для палива з $Q_{nn2} = 23,0$ МДж/кг $g_{0w} = \frac{3,6}{23,0 \cdot 0,35} = 0,447$ кг/кВт·год.

Складові питомих витрат	$Q_{nn1} = 27,6$ МДж/кг при α		$Q_{nn2} = 23,0$ МДж/кг при α	
	0,8	0,9	0,8	0,9
g_{0w}	0,373	0,373	0,447	0,447
g_{0n}	0,035	0,018	0,042	0,022

g_0	0,408	0,391	0,489	0,469
-------	-------	-------	-------	-------

Висновки. Проаналізуємо одержані результати:

- при використанні більш якісного палива (збільшенні теплоти згорання з 23,0 до 27,6 МДж/кг) складова g_{0w} зменшується на 74 г/кВт·год або на 20 %;
- при вирівнюванні ГЕН (збільшенні коефіцієнта нерівномірності з 0,8 до 0,9) складова питомих витрат g_{0n} зменшується на 17 г/кВт·год для палива з $Q_{nn1} = 27,6$ МДж/кг і на 20 г/кВт·год для палива з $Q_{nn2} = 23,0$ МДж/кг;
- при використанні більш якісного палива (збільшенні теплоти згорання з 23,0 до 27,6 МДж/кг) сумарні питомі витрати g_0 зменшуються на 81 г/кВт·год або на 16,4 % при $\alpha = 0,8$ і на 78 г/кВт·год або на 16,6 % при $\alpha = 0,9$.

Слід ураховувати, що "підсвічування" вугілля природним газом дозволить збільшити теплоту згорання палива з 23,0 до близько 27,0 МДж/кг. Водночас зменшиться питома витрата палива з 0,469 (при $\alpha = 0,9$) десь до 0,39 кг/кВт·год. З іншого боку, для такого режиму (при використанні природного газу) характерні додаткові втрати вугілля (див. приклад 3.3), що збільшить сумарну питому витрату палива до 0,407 кг/кВт·год. Проте рішення щодо "підсвічування" вугілля цілком може виявитися економічно доцільним.

Приклад 3.5. Для умов технічного переоснащення енергоблоку потужністю 200 МВт визначити теплоту згорання вугілля, що може бути використане при зазначених у табл. 2.7 питомих витратах. Розрахунки виконати для всіх варіантів: існуючого, ремонту, маловитратної модернізації, повної модернізації та реконструкції енергоблоку.

Розв'язування. Перетворимо рівняння (3.3) відносно теплоти згорання натурального палива (вугілля) до вигляду

$$Q_{nn} = \frac{Q_{0m}}{\eta_{gn} g_0}.$$

Наприклад, визначимо теплоту згорання вугілля для існуючого варіанта для граничних значень питомих витрат палива (420–400 г н.п./кВт·год):

$$Q_{nn}^{\min} = \frac{3,6}{0,35 \cdot 0,42} = 24,5 \text{ МДж/кг}; \quad Q_{nn}^{\max} = \frac{3,6}{0,35 \cdot 0,4} = 25,7 \text{ МДж/кг}.$$

Аналогічно виконаємо розрахунки для інших варіантів технічного переоснащення енергоблоку і отримані результати запишемо у таблицю.

Варіанти переоснащення				
Існуючий	Ремонт	Модернізація		Реконструкція
		Маловитратна	Повна	
24,5 – 25,7	24,4 – 25,6	24,3 – 26,3	24,6 – 26,3	24,9 – 25,6

Враховуючи результати розрахунків, можна запропонувати наступне. При удосконаленні діючих ТЕС або заміні на новітні технології генерації енергії з'явилася б можливість підвищити коефіцієнт k_{nn} з 33 до 38 %, що дозволяє

зменшити питомі витрати умовного палива за першою складовою g_{0w} на 0,049 кг/кВт·год. Друга складова питомих витрат g_{0n} може бути зменшена на величину до 0,02 кг у.п./кВт·год за рахунок підвищення значення коефіцієнта нерівномірності ГЕН α з 0,85 до 0,95. Загалом упровадження таких рішень дозволить отримати економію умовного палива в межах 60 – 70 г у.п./кВт·год. З урахуванням обсягів виробництва електроенергії на ТЕС економія складе до 4 млн т умовного або близько 5 млн т натурального палива (вугілля), що у грошовому еквіваленті дорівнює приблизно 5 млрд грн.

Можливі шляхи вирішення проблеми нерівномірності графіка електроспоживання

Аналіз основних показників використання палива на діючих ТЕС України та їх взаємозв'язків виявив велику частку паливної складової у витратах на виробництво електроенергії. При цьому привертає на себе увагу варіант з більш малими витратами палива на кращих ТЕС, ГТУ, ПГУ та станціях з комбінованим виробництвом енергії. Звідси видно і шляхи зниження питомої витрати палива на ТЕС – це підвищення якості палива, модернізація або заміна котлоагрегатів на установки з досконалішою технологією спалювання палива, а також виведення ТЕС з участі у покритті пікових навантажень в ОЕС України. У цьому разі доцільно для ТЕС, працюючих на вугільному паливі, збагачувати рядове вугілля з метою виключення використання природного газу і мазуту для "підсвічування". Частина такого природного газу доцільно використовувати для ГТУ, що мають непогані маневрені характеристики і можуть бути застосовані для покриття пікових навантажень. Такий шлях – перспективний, проте він вимагає відповідних інвестицій для будівництва ГТУ.

Привабливий варіант використання ГТУ в рамках декількох європейських країн (Польща, Німеччина, Чехія та інші). Схема надто проста. Річ лише в тому, що проблема покриття пікових навантажень існує не тільки в Україні, але і в інших європейських державах. Створення маневрених потужностей на базі ГТУ в кожній окремо взятій країні вимагає відповідних інвестицій, сума яких значно перевищуватиме суму витрат на спорудження базового маневреного комплексу, який складається з декількох ГТУ. Сумарна потужність комплексу має бути достатньою для покриття пікових навантажень будь-якої країни. З урахуванням часових поясів такий проект покриття пікових навантажень цілком реальний. Оцінка проектів транспортування енергоносіїв у вигляді вугільного палива і природного газу порівняно з передачею електричної енергії по ЛЕП надвисокої напруги свідчить про те, що фінансові витрати за останнім варіантом будуть меншими, ніж витрати на транспортування вугілля і природного газу.

Перспектива щодо застосування ГТУ в енергетиці України обґрунтовується не тільки зростаючими можливостями використання природного газу, але і порівняльними вартісними показниками. Вартість отримання одиниці тепла з палива з урахуванням видобутку, транспортування, підготовки і подачі у форсунки або завантаження в реактор співвідноситься таким чином: природний газ дешевше за ядерне паливо на 53 %, вугілля – на 29, мазут – на 35. Якщо припустити, що відбудеться підвищення вартості природного газу до рівня ядерного палива, то економічна привабливість спорудження ГТУ все одно збережеться,

оскільки вартість 1 кВт встановленої потужності ГТУ складає 250–500 дол./кВт (за даними світового банку 357 дол./кВт), тобто нижче такого ж показника для АЕС у 8–12 разів і КЕС у 3–6 разів. Також перевага застосування ГТУ у тому, що вони ефективно працюють у режимі когенерації.

Високозольне вугілля з підвищеним вмістом сірки перспективно спалювати за сучасною технологією – в котлах з ЦКШ, оскільки воно не збагачується по сірці, а на існуючих ТЕС сіркоочищення відсутнє. Проекти впровадження ТЕС з котлами ЦКШ повинні бути узгоджені з обсягами видобутку низькосортного вугілля в Україні.

З точки зору економії палива, то перспективним є розвиток генеруючих потужностей на базі ПГУ з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля.

Висока економічність відносно палива і непогані маневрені характеристики ТЕЦ вказують на доцільність їх застосування в структурі генеруючих потужностей ОЕС України. При цьому ТЕЦ слід ефективніше використовувати для покриття нерівномірності графіка електроспоживання, враховуючи, що розвантаження ТЕЦ вигідніше, ніж розвантаження АЕС і КЕС.

Таким чином, для надійної роботи енергетики в структурі енергокомплексу України електричні станції мають відрізнятися за потужністю, типом і вживаним видом палива.

Контрольні питання

1. Які спостерігаються тенденції споживання палива в електроенергетиці?
2. Наведіть основні причини та фактори, що впливають на витрати палива на ТЕС.
3. Назвіть елементарний склад палива.
4. Дайте визначення поняття "теплота згорання палива". Наведіть приклади.
5. Що слід відносити до ефективності використання палива?
6. Які основні фактори впливають на величину питомих витрат палива?
7. Охарактеризуйте величину питомих витрат палива.
8. Якими показниками характеризується якість палива?
9. Покажіть ефективність і доцільність збагачення вугілля.
10. Поясніть, за рахунок чого виникають втрати вугілля при використанні додаткового палива (газу або мазуту).
11. Для чого на електростанції застосовують додаткове паливо?
12. Надайте тлумачення та назвіть наслідки нерівномірності електроспоживання.
13. Визначте зв'язок між коефіцієнтами нерівномірності та форми ГЕН?
14. За якими складовими визначаються загальні питомі витрати палива?
15. Укажіть можливі шляхи вирішення проблеми нерівномірності електроспоживання.

Завдання до самостійної роботи

Згідно з умовами прикладу 3.1 визначити декілька значень ККД використання палива, змінюючи величини коефіцієнта технічного стану енергоблоку до 0,3. Порівняти отримані показники з фактичними, що наведені в табл. 2.2, проаналізувати та зробити відповідні висновки.

Питомі витрати палива для виробництва 1 кВт·год електроенергії залежать від коефіцієнта перетворення палива, якості палива та теплоти його згорання, нерівномірності електроспоживання та інших чинників. Фактичні питомі витрати палива на деяких ТЕС наведені в другій лекції (див. табл. 2.2). Енергостратегія-2012 передбачає зниження питомих витрат палива з 396 у 2009 р. до 347 г у.п./кВт·год у 2030 р.