

Andrzej ZIĘBIK
Instytut Techniki Ciepłej
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
ziebik@itc.ise.polsl.gliwice.pl

PRZEGLĄD EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH I EKOLOGICZNYCH RÓŻNYCH SPOSOBÓW REALIZACJI GOSPODARKI SKOJARZONEJ CIEPLNO - ELEKTRYCZNEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodykę oraz rezultaty oceny efektów energetycznych i ekologicznych dla różnych przypadków realizacji gospodarki skojarzonej ciepłno-elektrycznej w Polsce. Obok elektrociepłowni komunalnych i przemysłowych gospodarka skojarzona jest także realizowana poprzez uciepłnienie bloków energetycznych. Zwrócono uwagę na strukturę cen paliw w Polsce, która hamuje rozwój elektrociepłowni opalanych gazem ziemnym. Tylko elektrociepłownie opalane nietypowymi gazami palnymi (palne gazy technologiczne, gaz z odmetanowania kopalni, gaz ziemny pozasystemowy) są opłacalne. Ustawodawstwo energetyczne, wzorowane na unijnym, sprzyja w zasadzie rozwojowi skojarzonej gospodarki ciepłno-elektrycznej w Polsce.

A SURVEY OF ENERGY AND ECOLOGICAL EFFECTS CONCERNING VARIOUS WAYS OF THE REALIZATION OF CO- GENERATION IN POLAND

Summary. The paper presents a method and the results of assessing the energy and ecological effects in the case of various ways in which CHP are realised in Poland, where hard coal is the dominating primary fuel. Besides district heating and industrial CHP's heat is produced in co-generation also in power stations adapted to the production of heat. Attention has been drawn to the disadvantageous structure of prices for primary fuels in Poland which hampers the development of CHP's fired with natural gas. Only CHP's fired with untypical fuel gases (technological fuel gases, mining gas, biogas etc.) ensure profitability. It has been stressed that the Polish legislation complying with that of UE can favour the development of co-generation in Poland.

Oznaczenia

- E_{el} - produkcja brutto energii elektrycznej
 $E_{ch\ el}$ - zużycie energii chemicznej paliwa w elektrowni zawodowej
 $E_{ch\ c}$ - zużycie energii chemicznej paliwa w ciepłowni

- $-\Delta E_{ch}$ - oszczędność energii chemicznej paliwa
- ΔE_{chz} - przyrost zużycia energii chemicznej paliwa w zastąpionej elektrowni
- $-\Delta E_{el}$ - zmniejszenie produkcji energii elektrycznej na skutek ucieplwienia bloku energetycznego
- e_i - wskaźnik emisji i-tej substancji szkodliwej
- K - koszt instalacji technologicznej
- K_{od} - koszt instalacji odzysku ciepła
- K_{cod} - koszt ciepła z instalacji odzyskowej
- k_{po} - koszt jednostkowy paliwa odpadowego
- k_{pp} - koszt jednostkowy paliwa podstawowego
- k_{cec} - koszt jednostkowy ciepła w elektrociepłowni
- $N_{el ec}$ - moc nominalna brutto elektrociepłowni
- $N_{el k}$ - moc nominalna netto elektrowni zawodowej
- Q, Q_o - produkcja brutto ciepła i zapotrzebowanie ciepła przez odbiorców
- Q_{od} - ciepło odpadowe
- S_{ic} - emisja i-tej szkodliwej substancji w ciepłowni
- ΔS_{iel} - zwiększenie emisji i-tej szkodliwej substancji w zastąpionej elektrowni
- $-\Delta S_i$ - zmniejszenie emisji i-tej szkodliwej substancji
- W_d - wartość opałowa
- ε - wskaźnik ubytku mocy turbogeneratora
- ε_{el} - wskaźnik elektrycznych potrzeb własnych
- ε_c - wskaźnik cieplnych potrzeb własnych
- η_{Ec} - sprawność energetyczna netto ciepłowni
- η_{Eek} - sprawność energetyczna netto elektrowni kondensacyjnej
- η_{Eec} - sprawność energetyczna brutto elektrociepłowni (wskaźnik wykorzystania paliwa)
- η_{tp}, η'_{tp} - sprawność transformacji i przesyłania energii elektrycznej z elektrociepłowni i elektrowni
- η_{pc}, η'_{pc} - sprawność przesyłania ciepła z elektrociepłowni i ciepłowni
- η_{Epo} - sprawność energetyczna instalacji zasilanej paliwem odpadowym
- η_{Epp} - sprawność energetyczna instalacji opalanej paliwem podstawowym

Indeksy

- ec - elektrociepłownia
- c - ciepłownia,
- ek - elektrownia kondensacyjna

1. Wprowadzenie

Technologia skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej posiada w Polsce długotętną tradycję. Pierwsza turbina ciepłownicza została zainstalowana w końcu lat trzydziestych ubiegłego stulecia [1]. Tuż po wojnie elektrociepłownie krajowe powstawały w wyniku przystosowania przedwojennych elektrowni kondensacyjnych do pracy w skojarzeniu. Pierwszy stopień podgrzewania wody sieciowej stanowiły skraplacze pracujące z pogorszoną próżnią. W latach późniejszych elektrociepłownie krajowe były wyposażane w specjalistyczne turbiny ciepłownicze: przeciwprężne, upustowo-przeciwprężne, upustowo-kondensacyjne. Od pierwszych lat powojennych skojarzona gospodarka ciepłno-elektryczna była przedmiotem szczególnego zainteresowania w Katedrze Energetyki Ciepłej a następnie w Instytucie Techniki Ciepłej.

W okresie ostatnich dwudziestu pięciu lat elektrociepłownie krajowe były wyposażane w bloki ciepłownicze, a w ostatnim dziesięcioleciu instalowano w nich z powodzeniem kotły fluidalne. Również w tym okresie przystosowano w kilku elektrowniach bloki energetyczne do współpracy z miejskimi systemami ciepłowniczymi. W blokach energetycznych uciepłownionych podstawowym miejscem poboru pary ciepłowniczey jest przelotnia między średnio- i niskoprężną częścią turbiny. Węgiel był i pozostaje nadal podstawowym paliwem w krajowych elektrociepłowniach. W ostatnim dziesięcioleciu nastąpiło także uruchomienie średnich i małych elektrociepłowni opalanych gazami palnymi, przy czym struktura cen paliw w Polsce nie sprzyja rozwojowi elektrociepłowni zasilanych gazem ziemnym. W kraju znaczącą pozycję zajmują także elektrociepłownie przemysłowe, w których obok węgla spala się palne gazy technologiczne oraz ciekłe i stałe paliwa odpadowe.

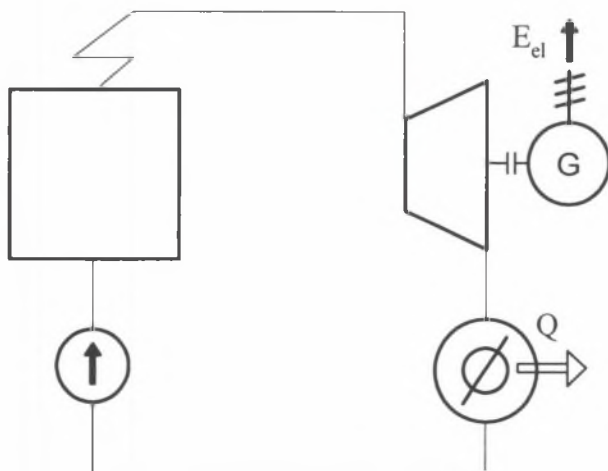
Udział elektrociepłowni komunalnych i przemysłowych w krajowej produkcji energii elektrycznej wynosi około 19%. Stosunek produkcji elektryczności do produkcji ciepła wynosi blisko 27,5%. Część energii elektrycznej jest wytwarzana w członach kondensacyjnych turbin ciepłowniczych. Udział energii elektrycznej produkowanej w Polsce w skojarzeniu z produkcją ciepła wynosi 15÷16% [1].

W celu oceny efektów energetycznych gospodarki skojarzonej ciepłno-elektrycznej oblicza się oszczędność energii chemicznej paliwa w odniesieniu do jednostki produkowanego ciepła. Tę oszczędność wyznacza się porównując zużycie energii chemicznej w elektrociepłowni z unikniętym zużyciem energii chemicznej paliwa w ciepłowniach i elektrowniach kondensacyjnych, przy założeniu pokrycia tego samego zapotrzebowania na ciepło i energię elektryczną u odbiorcy końcowego. W przypadku bloków energetycznych przystosowanych do ciepłownictwa do oceny efektów energetycznych używa się wskaźnika ubytku mocy turbogenerатора na skutek uciepłownienia. Do oceny efektów energetycznych wprowadza się także pojęcie sprawności cząstkowej wytwarzania ciepła, którą oblicza się w oparciu o wykorzystanie zasady unikniętych nakładów paliwowych. Efekty ekologiczne gospodarki skojarzonej ciepłno-elektrycznej oblicza się również w odniesieniu do jednostki produkowanego ciepła, wykorzystując taką samą metodykę jak w przypadku obliczeń efektów energetycznych.

2. Uzasadnienie energetyczne skojarzonej gospodarki ciepło-elektrycznej

Stopień nieodwracalności procesów cieplnych można zmniejszyć poprzez kojarzenie ze sobą procesów cieplnych w celu zmniejszenia liczby oraz zakresu przemian nieodwracalnych [2,3]. Towarzyszące temu efekty ekologiczne polegają na zmniejszeniu emisji szkodliwych substancji z powodu zmniejszonego zużycia paliwa.

Elektryczność i ciepło mogą być produkowane w dwóch niezależnych procesach, tzn. w elektrowni kondensacyjnej i w ciepłowni. W elektrowni jest realizowany obieg silnika. Produkcję ciepła można analizować rozpatrując obieg pompy ciepła. Oba te obiegi zawierają w sobie nieodwracalny proces wymiany ciepła z otoczeniem. Z uwagi na to, że kierunki wymiany ciepła z otoczeniem są w obu obiegach odwrotne, można usunąć otoczenie jak pośredniczące źródło ciepła. Wystarczy proces rozprężania w silniku zakończyć na takim poziomie parametrów termicznych, aby możliwy był transport ciepła do pomieszczenia ogrzewanego. Otrzymuje się wówczas obieg silnikowo-grzejny, który jest praktycznie realizowany w elektrociepłowni. Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy klasycznej elektrociepłowni z turbiną przeciwprężną.



Rys. 1. Schemat ideowy klasycznej elektrociepłowni z turbiną przeciwprężną
Fig. 1. Classical CHP equipped with a back-pressure turbine

Drugi argument za gospodarką skojarzoną ciepło-elektryczną wynika z porównania sprawności energetycznej i egzergetycznej kotłów ciepłowni i elektrociepłowni. Kotły charakteryzują się wyjątkowo wysokimi stratami egzergii [5]. Te straty można zmniejszyć przez podwyższenie parametrów pary świeżej. W elektrociepłowniach parametry pary świeżej są znacznie wyższe niż parametry termiczne czynnika w kotłach ciepłowni, szczególnie wyposażonych w kotły wodne. W ten sposób dzięki realizacji skojarzonej gospodarki ciepło-elektrycznej można wpłynąć na obniżenie strat egzergii.

Trzeci argument za gospodarką skojarzoną ciepło-elektryczną wynika z możliwości częściowej kompensacji strat przesyłania ciepła. Zwiększenie bowiem

produkcji ciepła z powodu pokrywania strat przesyłania wpływa na podwyższenie efektów użytecznych gospodarki skojarzonej i przez to powoduje, że straty przesyłania ciepła są mniej uciążliwe.

3. Energetyczne i ekologiczne efekty skojarzenia w elektrociepłowniach opalanych węglem

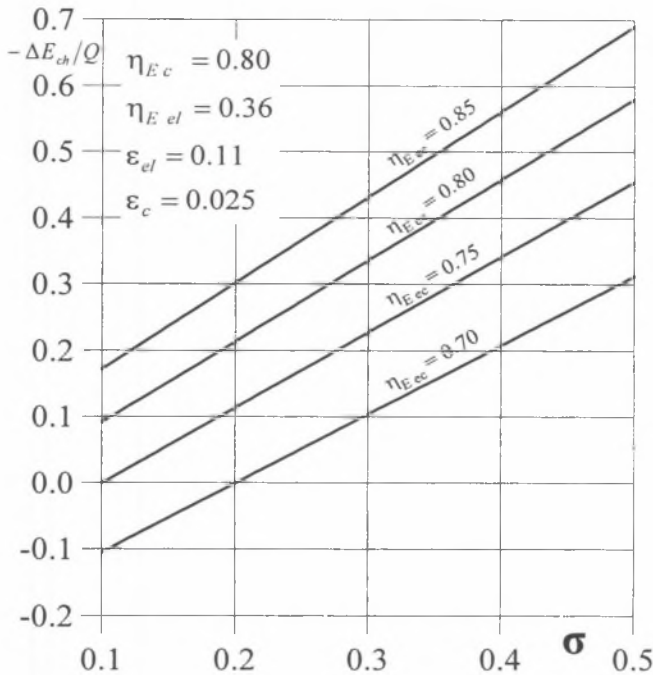
Oszczędność energii chemicznej paliwa wynika z porównania zużycia energii chemicznej paliwa w ciepłowni i elektrowni kondensacyjnej, działających w trybie gospodarki rozdzielonej ze zużyciem w elektrociepłowni. Zakłada się przy tym, że zapotrzebowanie na ciepło i elektryczność u odbiorców jest jednakowe w obu przypadkach. Przyjmując, że sprawności przesyłania ciepła i energii elektrycznej są jednakowe dla gospodarki rozdzielonej i skojarzonej, otrzymuje się:

$$\frac{-\Delta E_{ch}}{Q} = \frac{1 - \varepsilon_c}{\eta_{Ec}} - \frac{1}{\eta_{Eec}} + \sigma \left(\frac{1 - \varepsilon_{el}}{\eta_{Eek}} - \frac{1}{\eta_{Eec}} \right), \quad (1)$$

przy czym wskaźnik skojarzenia ujmuje równanie:

$$\sigma = \frac{E_{el}}{Q} \quad (2)$$

Na rysunku 2 przedstawiono zależność wskaźnika oszczędności energii chemicznej paliwa od wskaźnika skojarzenia i sprawności brutto elektrociepłowni. Pozostałe wielkości przyjęto jako przeciętne dla polskich warunków.



Rys. 2. Zależność wskaźnika oszczędności energii chemicznej paliwa od wskaźnika skojarzenia i sprawności energetycznej brutto elektrociepłowni
 Fig. 2. Index of the saving of chemical energy of fuel

Podział zużycia energii chemicznej paliwa między produkcję ciepła i elektryczności jest związany z określeniem sprawności cząstkowych wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. W celu ich określenia należy wykorzystać metodę unikniętych nakładów paliwowych, nazywaną także metodą procesu zastąpionego. Energia elektryczna wytwarzana w elektrociepłowni zastępuje wytwarzanie elektryczności w systemie elektroenergetycznym. Dlatego należy ją obciążyć takim zużyciem paliwa, jakie ma miejsce w zastąpionej elektrowni systemowej. Moc zastąpiona w elektrowni systemowej wynika z warunku równości mocy elektrycznej u odbiorcy w rozważanych dwóch przypadkach gospodarki skojarzonej i rozdzielonej:

$$N_{el\ ec} (1 - \varepsilon_{el}) \eta_{ip} = N_{el\ ek} \eta'_{ip} \quad (3)$$

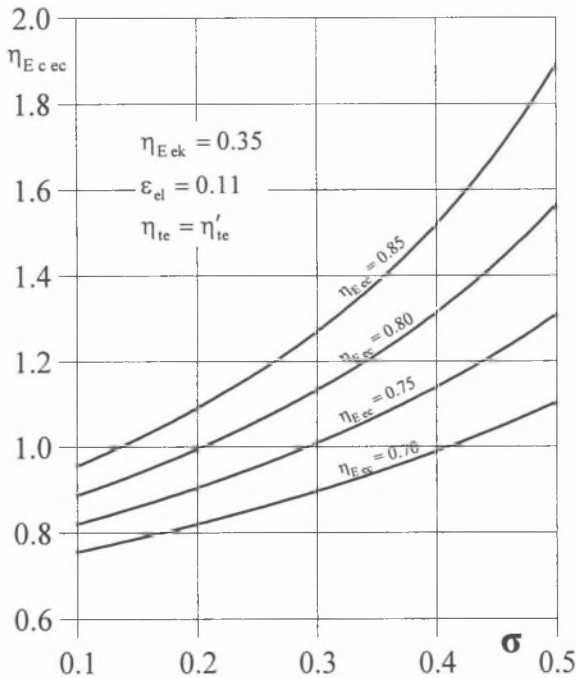
Po zastosowaniu zasady unikniętych nakładów paliwowych otrzymuje się relację na sprawność cząstkową wytwarzania energii elektrycznej w elektrociepłowni [4]:

$$\eta_{E\ el\ ec} = \eta_{E\ ek} \frac{\eta'_{ip}}{(1 - \varepsilon_{el}) \eta_{ip}} \quad (4)$$

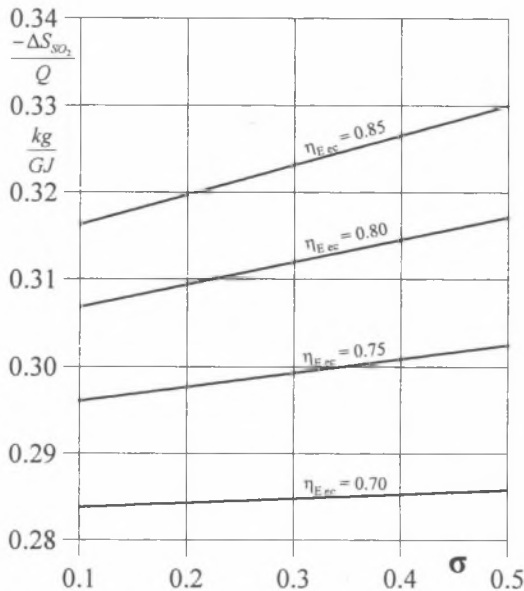
Sprawność cząstkowa wytwarzania ciepła w elektrociepłowni wynika z równania:

$$\eta_{Ecc} = \frac{\eta_{Eec}}{1 - \sigma \left[\frac{\eta_{Eec} \eta_{te} (1 - \epsilon_{el})}{\eta_{Eek} \eta_{te}} - 1 \right]} \tag{5}$$

Z uwagi na to, że $\eta_{Eec} > \eta_{Eek}$, sprawność cząstkowa wytwarzania ciepła w elektrociepłowni jest większa aniżeli sprawność energetyczna elektrociepłowni. Im większa jest wartość wskaźnika skojarzenia, tym większe są sprawności cząstkowe wytwarzania ciepła. Dlatego efektywnie energetycznie jest podwyższanie parametrów pary świeżej i obniżanie parametrów pary ciepłowniczej (upustowej lub przeciwprężnej). Sprawność cząstkowa wytwarzania ciepła może przyjmować wartości większe od jedności, ponieważ ideą elektrociepłowni jest skojarzenie silnika i pompy ciepła, której sprawność energetyczna przyjmuje zawsze wartości większe od jedności (rysunek 3).



Rys. 3. Sprawność cząstkowa wytwarzania ciepła w elektrociepłowni
 Fig. 3. Partial energy efficiency of heat production in a CHP



Rys. 4. Zmniejszenie wskaźnika emisji SO₂ dzięki skojarzonej gospodarce ciepno-elektrycznej

Fig. 4. Decreased of SO₂ emission thanks to co-generation

Oszczędność paliwa w gospodarce skojarzonej prowadzi do obniżenia emisji szkodliwych substancji. Zakładając, że sprawności przesyłania ciepła i elektryczności oraz wartość opałowa paliwa są jednakowe w przypadku gospodarki rozdzielonej i skojarzonej, otrzymuje się następującą relację na zmniejszenie emisji i-tej substancji szkodliwej:

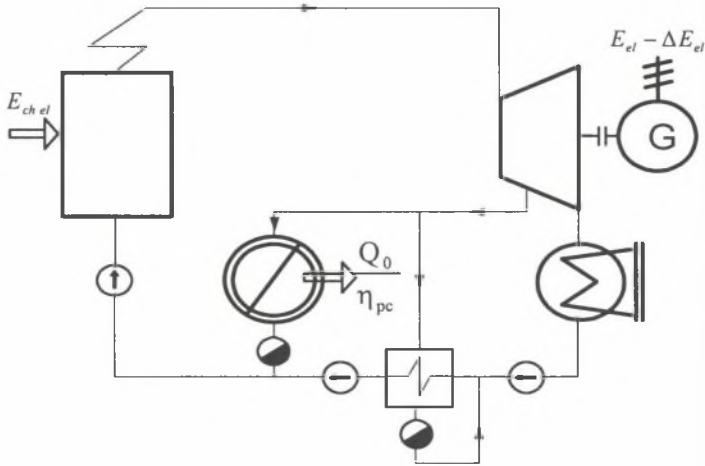
$$-\frac{\Delta S_i}{Q} = \frac{(1 - \varepsilon_c)}{W_d} \left[\frac{e_{i c}}{\eta_{E c}} - \frac{e_{i ec}}{\eta_{E ec} (1 - \varepsilon_c)} \right] + \sigma \left[\frac{e_{i ek}}{\eta_{E ek}} - \frac{e_{i ec}}{\eta_{E ec} (1 - \varepsilon_{el})} \right] \frac{(1 - \varepsilon_{el})}{W_d} \quad (6)$$

Efekty ekologiczne uzyskane dzięki skojarzonej gospodarce ciepno-elektrycznej zależą nie tylko od oszczędności paliwa, lecz także od wartości wskaźników emisji w gospodarce rozdzielonej i skojarzonej. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowo zmniejszenie wskaźnika emisji SO₂ uzyskane dzięki skojarzonej gospodarce ciepno-elektrycznej.

4. Efekty energetyczne i ekologiczne ucieplnienia bloków energetycznych

Przystosowanie kondensacyjnych bloków energetycznych do produkcji ciepła prowadzi do realizacji skojarzonej gospodarki ciepno-elektrycznej. Przyjmując, że zużycie energii chemicznej paliwa pozostaje bez zmiany, ucieplnienie bloku prowadzi do obniżenia produkcji energii elektrycznej. Ten ubytek należy skompensować przez

dotatkową produkcję energii elektrycznej w zastąpionej elektrowni systemowej. Rysunek 5 przedstawia schemat ucieplonego bloku energetycznego.



Rys. 5. Schemat ucieplonego bloku energetycznego
 Fig. 5. Power plant after adaptation to heat production

Zużycie energii chemicznej paliwa w przypadku rozdzielonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej jest wyrażone za pomocą równania:

$$E_{ch r} = E_{ch ek} + E_{ch c} \tag{7}$$

Zużycie energii chemicznej paliwa w układzie z blokiem ucieplonym ma postać:

$$E_{ch sk} = E_{ch ek} + \Delta E_{ch z} \tag{8}$$

Z układu równań (7) i (8) otrzymuje się relację na oszczędność energii chemicznej paliwa uzyskaną dzięki przystosowaniu bloku energetycznego do oddawania ciepła:

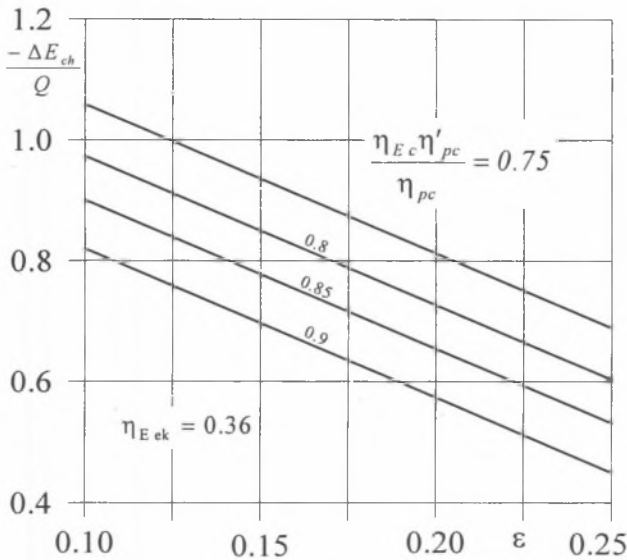
$$-\Delta E_{ch} = \frac{Q_0}{\eta_{pc} \eta_{Ec}} - \frac{-\Delta E_{el}}{\eta_{Eek}} \tag{9}$$

Do dalszej analizy wprowadza się pojęcie wskaźnika ubytku produkcji energii elektrycznej na skutek ucieplnienia bloku energetycznego:

$$\varepsilon = \frac{-\Delta E_{el}}{Q_0} \eta_{pc} \tag{10}$$

Po wykorzystaniu relacji (10) otrzymuje się:

$$-\frac{\Delta E_{ch}}{Q} = \frac{\eta_{pc}}{\eta_{pc} \eta_{Ec}} - \frac{\varepsilon}{\eta_{Eek}} \tag{11}$$



Rys. 6. Wskaźnik oszczędności energii chemicznej paliwa w funkcji wskaźnika ubytku produkcji energii elektrycznej

Fig. 6. Savings of chemical energy of fuels due to adopted of power plant to production of heat

Na rysunku 6 przedstawiono wskaźnik oszczędności energii chemicznej paliwa w funkcji wskaźnika ubytku produkcji energii elektrycznej. Oszczędność energii chemicznej paliwa uzyskana dzięki uciepłnieniu bloku energetycznego jest większa, im niższy jest wskaźnik ubytku produkcji energii elektrycznej, czyli im niższe jest ciśnienie pary przeznaczonej do celów ciepłownictwa.

Na skutek uciepłnienia bloku energetycznego ilość produkowanej energii elektrycznej obniża się i musi być skompensowana przez dodatkową produkcję energii elektrycznej w zastąpionej elektrowni systemowej. To oznacza, że produkcja ciepła w bloku uciepłnionym powinna być obciążona takim zużyciem energii chemicznej paliwa, jakie wystąpi w zastąpionej elektrowni kondensacyjnej, kompensującej ubytek w produkcji energii elektrycznej. To rozumowanie prowadzi do sprawności cząstkowej wytwarzania ciepła w bloku uciepłnionym:

$$\eta_{Ec} = \frac{Q}{-\Delta E_{el}} \eta_{Eek} = \frac{\eta_{Eek}}{\varepsilon} \quad (12)$$

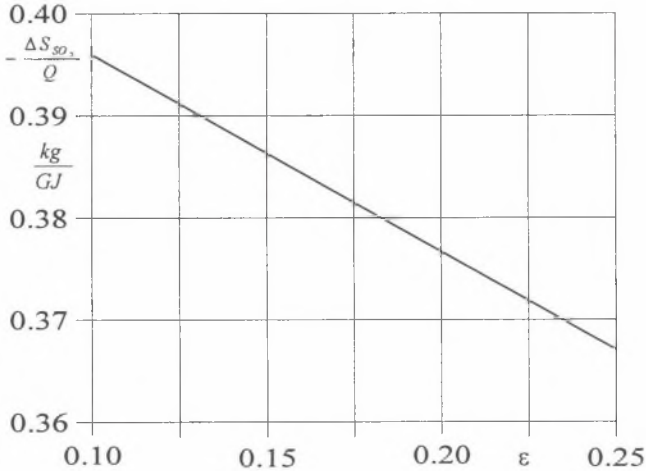
Dla przykładu w przypadku najczęściej spotykanej wartości $\varepsilon=0,15$ (pobór pary z przelotni między częścią średnio- i niskoprężną turbiny) i dla sprawności zastąpionej elektrowni $\eta_{Eek}=0,36$ cząstkowa sprawność wytwarzania ciepła bloku uciepłnionego przyjmuje wartość $\eta_{Ec}=2,4$. Jak już wspomniano poprzednio, wynik obliczeń jest poprawny, ponieważ pozostaje w zgodzie z ideą skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Im niższą wartość przyjmuje wskaźnik ubytku produkcji energii elektrycznej, tym większą wartość posiada sprawność cząstkowa wytwarzania ciepła w bloku uciepłnionym.

Oszczędność paliwa uzyskana dzięki ucieplonieniu prowadzi do obniżenia emisji szkodliwych substancji do środowiska:

$$-\Delta S_i = S_{i,c} - \Delta S_{i,ek} \quad (13)$$

Równanie (13) jest słuszne przy założeniu, że zużycie energii chemicznej paliwa w bloku energetycznym jest takie samo przed i po ucieplonieniu. Po przekształceniu podobnym jak poprzednio otrzymuje się:

$$-\frac{\Delta S_i}{Q} = \frac{\eta_{pc} e_{i,c}}{\eta_{pc} \eta_{Ec} W_d} - \varepsilon \frac{e_{i,ek}}{\eta_{Eek} W_{dek}} \quad (14)$$



Rys. 7. Przebieg wskaźnika zmniejszenia emisji SO₂ dzięki ucieplonieniu bloku energetycznego

Fig. 7. Decreasing of SO₂ emission due to adopted of power plant to the production of heat

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg wskaźnika zmniejszenia emisji SO₂ uzyskanego dzięki ucieplonieniu bloku energetycznego. Wykres otrzymano przyjmując następujące dane: $e_{SO_2c} = 8,5$ g/kg paliwa; $e_{SO_2ek} = 1,6$ g/kg paliwa; $W_{dc} = W_{dek} = 23$ MJ/kg; $\eta'_{pc} = 0,89$; $\eta_{pc} = 0,85$; $\eta_{Ec} = 0,85$; $\eta_{Eek} = 0,36$.

5. Elektrociepłownie przemysłowe - specyficzne problemy

Moc elektryczna zainstalowana w polskich elektrociepłowniach przemysłowych wynosi około 3 GW, co stanowi blisko 9% mocy zainstalowanej w krajowym systemie elektroenergetycznym. Udział elektrociepłowni przemysłowych w krajowej produkcji energii elektrycznej waha się w granicach 5÷5,5%, przy czym w skojarzeniu udział ten wynosi blisko 4,5% [1]. Największe elektrociepłownie przemysłowe pracują w przemyśle metalurgicznym i chemicznym. Około 40% mocy elektrycznej jest zainstalowane w elektrociepłowniach przemysłowych o mocach przekraczających 100 MW_{el}, przy czym największa krajowa elektrociepłownia przemysłowa posiada moc około 300 MW_{el}.

W większości krajowych elektrociepłowni przemysłowych paliwem podstawowym jest węgiel kamienny. W części z nich spala się paliwa odpadowe (odpadowy olej ciężki, gaz wielkopieczowy, gaz konwertorowy, gaz koksowniczy, gaz gardzielowy z pieców szybowych metalurgii kolorowej, siarkę, ług powarzelnny, korę i odpady drewna). Paliwa odpadowe są w większości produktami ubocznymi skojarzonych procesów energotechnologicznych. Koszt jednostkowy tych paliw powinien być oceniany według zasady unikniętych kosztów z uwzględnieniem stosunku zastępowania. To prowadzi do relacji:

$$k_{po} = Z k_{pp} \quad (15)$$

Zakładając, że efekt użyteczny (ilość ciepła przekazywanego do czynnika termodynamicznego) jest taki sam, stosunek zastępowania oblicza się z równania:

$$Z = \frac{\eta_{E po}}{\eta_{E pp}} \quad (16)$$

Elektrociepłownia przemysłowa pracuje na potrzeby podsystemu technologicznego zakładu przemysłowego, który jest także wytwórcą pary grzejnej i gorącej wody pochodzących z instalacji odzyskiwania energii odpadowej. Ma to istotny wpływ na gospodarkę cieplną elektrociepłowni w przypadku, gdy nie ma nowych odbiorców ciepła. Koszt jednostkowy ciepła z urządzeń odzyskowych powinien być oceniany według metody kosztów unikniętych. To oznacza, że:

$$K_{cod} = Q_{od} k_{c ec} \quad (17)$$

Koszt jednostkowy ciepła uzyskiwanego z elektrociepłowni powinien dotyczyć tych samych parametrów termicznych jak w przypadku nośnika ciepła odpadowego.

Wykorzystanie ciepła odpadowego jest opłacalne, jeżeli zachodzi:

$$K + K_{od} - K_{cod} < K \quad (18)$$

Ocena opłacalności wykorzystania ciepła odpadowego z instalacji technologicznych uwzględnia wpływ produkcji tego ciepła na produkcję energii elektrycznej w elektrociepłowni, ponieważ ocena kosztu jednostkowego ciepła w elektrociepłowni uwzględnia efekt zastępowania systemowej energii elektrycznej przez jej produkcję w skojarzeniu.

6. Elektrociepłownie zasilane paliwami gazowymi

W ostatnich dwu dekadach poprzedniego stulecia obserwowano intensywny rozwój elektrociepłowni opalanych gazem, szczególnie tzw. „small-scale CHP's”. W Polsce zainteresowanie tymi układami wzrosło w latach dziewięćdziesiątych. Jednak struktura cen paliw w Polsce nie sprzyja zastosowaniu ekologicznego gazu ziemnego w elektrociepłowniach. W porównaniu z krajami Unii Europejskiej proporcje między cenami gazu ziemnego dla odbiorców komunalnych i przemysłowych są w Polsce przeciwne. Jest to efekt skrośnego subsydiowania z okresu poprzedniego systemu politycznego w kraju. W roku 2001 liczba małych elektrociepłowni zasilanych gazem ziemnym nie przekraczała 70 [9]. Jest też kilka inwestycji średniej wielkości elektrociepłowni gazowych, przy czym część jest zasilana gazem ziemnym pozasystemowym.

Oszczędność energii chemicznej paliw uzyskana dzięki działaniu elektrociepłowni gazowych może być obliczana za pomocą formuły (1). W tym przypadku wskaźnik

skojarzenia jest wyższy ($\sigma=0.5 \div 0.8$), a co za tym idzie, efekty energetyczne i ekologiczne są korzystniejsze. Efektywność ekonomiczna zależy jednak od ceny gazu ziemnego w Polsce. Na podstawie analizy zaprezentowanej w [9] można stwierdzić, że w warunkach polskich:

- małe elektrociepłownie opalane innymi gazami (np. gaz kopalniany) niż ziemny są opłacalne,
- elektrociepłownie opalane gazem ziemnym pozasystemowym są opłacalne, jeżeli czas wykorzystania nominalnej mocy cieplnej jest odpowiednio wysoki (np. pokrywane jest zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową),
- elektrociepłownie komunalne opalane gazem ziemnym systemowym są przy obecnej strukturze cen paliw nieopłacalne.

Trwają prace nad projektem przeksztalcenia elektrociepłowni tradycyjnej hutniczej opalanej głównie gazem wielkopieczowym w układ gazowo-parowy [10]. Wstępne wyniki analizy ekonomicznej wskazują, że czas zwrotu inwestycji będzie się mieścił w strefie umiarkowanej 5÷7 lat.

7. Gospodarka skojarzona w Ustawie *Prawo energetyczne*

Polskie prawo energetyczne (po nowelizacji z dnia 01.01.2003) stanowi w art. 9a, §2 co następuje: „Przedsiębiorstwa energetyczne będące jednocześnie operatorami systemu dystrybucyjnego elektroenergetycznego są obowiązane w zakresie określonym w rozporządzeniu wydanym na podstawie ust. 4, do zakupu oferowanej im energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła, ze źródeł znajdujących się na obszarze kraju określonym w koncesji, przyłączonych bezpośrednio do tych przedsiębiorstw”.

Obowiązek zakupu energii jest dodatkowo uwarunkowany przepisami ujętymi w rozporządzeniu, które narzucają obowiązek dotrzymania średniorocznej sprawności energetycznej elektrociepłowni na wymaganym poziomie (dotychczas 65%) i przestrzegania norm ochrony środowiska. Uzasadnione koszty wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu są uregulowane przez rozporządzenie taryfowe. Formuła dotycząca kosztów sprzedaży energii elektrycznej wytworzonej w skojarzeniu bazuje na zasadzie kosztów unikniętych. To oznacza, że są one szacowane według kosztów ponoszonych na wytwarzanie energii elektrycznej w elektrowniach systemowych. Ta metoda jest znana w Polsce co najmniej od roku 1962 pod nazwą metody elektrowni równoważnej. Nie była ona jednak stosowana w okresie poprzedniej sytuacji politycznej, chociaż od momentu jej opublikowania (1962r.) była przedmiotem wykładu z gospodarki cieplnej [4].

8. Podsumowanie i wnioski

Udział energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu w całkowitej produkcji krajowej jest w Polsce wyższy niżeli przeciętny udział w Unii Europejskiej. Około 60% tej energii jest produkowane w elektrociepłowniach komunalnych, pozostała część pochodzi z elektrociepłowni przemysłowych.

W celu oceny efektów energetycznych i ekologicznych skojarzonej gospodarki ciepło-elektrycznej należy stosować konsekwentnie metodę unikniętych nakładów

paliwowych i szkodliwych emisji z nimi związanych w gospodarce rozdzielonej. W przypadku elektrociepłowni przemysłowych tę zasadę należy zastosować w odniesieniu do oceny kosztów palnych gazów technologicznych.

Polskie elektrociepłownie są głównie opalane węglem kamiennym. Zgodnie z najnowszymi informacjami dotyczącymi polityki energetycznej Polski węgiel pozostanie dominującym paliwem w strukturze pozyskania paliw pierwotnych przez co najmniej kilkanaście lat. Ze względu na obecną strukturę cen paliw w Polsce największe szanse powodzenia mają elektrociepłownie opalane gazami nietypowymi (technologiczne gazy palne, gaz kopalniany, biogaz, gaz ziemny zaazotowany z lokalnych źródeł).

Specyficzna dla warunków polskich jest produkcja ciepła w skojarzeniu w uciepłownionych blokach elektrowni zawodowych. Efekty energetyczne i ekologiczne są w tym przypadku nawet wyższe niż w klasycznych elektrociepłowniach opalanych węglem kamiennym.

Zapis w Ustawie *Prawo energetyczne* dotyczący skojarzonej gospodarki ciepłno-elektrycznej pozostaje w zgodzie z Dyrektywą 96/92 Unii Europejskiej i sprzyja rozwojowi gospodarki skojarzonej w Polsce.

Bibliografia

1. Pupka J.: Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej w polskiej energetyce zawodowej. Materiały Seminarium Komitetu Problemów Energetyki, PAN, Mikołajki 1998
2. Szargut J., Sama D.A.: Practical rules of the reduction of exergy losses causes by the thermodynamic imperfection of thermal processes. In: Proceedings of the Second International Thermal Energy Congress, Agadir 1995
3. Horlock J.H.: Co-generation – Combined heat-and-power (CHP). Malabar, Florida: Krieger Publishers Company, 1997
4. Szargut J., Ziębik A.: Podstawy energetyki cieplnej. Warszawa: PWN, 2000
5. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R.: Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. New York: Hemisphere Publ. Corp., 1988
6. Szargut J.: Application of steam from regenerative bleeds for the production of network heat in large steam power plants. *Archiwum Energetyki* 1999; XXVIII (1-2):83-93
7. Ziębik A.: Thermoeconomic problems of metallurgical combined heat-and-power plants. In: Proceedings of ECOS'01, Istanbul 2001
8. Ziębik A.: Comparison of the exergetic method and replacement method in partitioning the production costs of co-generation processes (on the example of a blast-furnace plant). In: Proceeding of ENSEC'93. Kraków 1993
9. Skorek J.: Ocena efektywności energetycznej i ekonomicznej gazowych układów kogeneracyjnych małej mocy. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002
10. Ziębik A., Warzyc M.: Effectiveness of the utilisation of technological low calorific gaseous fuels in an industrial combined gas-and-steam co-generation plant. In: Proceedings of ECOS'02, Berlin 2002