

Jan SZARGUT

Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska

## **EFEKTY ENERGETYCZNE I EKOLOGICZNE WDRAŻANIA ELEKTROCIĘPŁOWNI TURBOGAZOWYCH I PAROWO-GAZOWYCH NA GAZ ZIEMNY**

**Streszczenie.** Zdefiniowano wskaźniki charakteryzujące skumulowaną oszczędność energii chemicznej i skumulowane zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> zapewnione przez wdrożenie elektrociepłowni turbogazowej lub gazowo-parowej. Przykładowe obliczenia wykonano dla elektrociepłowni zasilanych gazem ziemnym. Wykazano znaczne korzyści energetyczne i ekologiczne, jakie można uzyskać za pomocą rozważanych elektrociepłowni.

## **ENERGY ECONOMY AND ECOLOGICAL EFFECTS ATTAINABLE BY MEANS OF GAS TURBINE OR GAS-AND-STEAM TURBINE COGENERATION PLANTS FED WITH NATURAL GAS**

**Summary.** Indices have been defined characterizing cumulative economy of chemical energy and cumulative reduction of CO<sub>2</sub> emission due to the introduction of cogeneration plants equipped with gas turbine or gas-and-steam turbine. Exemplary calculations have been performed for cogeneration plants fed with natural gas. Great effects attainable in energy economy and environmental protection have been pointed out.

## **ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ДОСТИГАЕМЫЕ ПРИ ПОМОЩИ ТЭЦ ОБОРУДОВАННОЙ ГАЗОВОЙ ИЛИ ГАЗОВОЙ И ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ, ПРИ СНАБЖЕНИИ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ**

**Резюме.** Определены показатели характеризующие наколенную экономию топлива и наколенное уменьшение эмиссии CO<sub>2</sub> получаемые при совместной выработке тепла и электроэнергии в ТЭЦ оборудованной газовой или газовой и паровой турбиной. Примерные расчеты сделаны для ТЭЦ снабжаемой природным газом. Указаны значительные энергетические и экологические пользы, которые можно достичь в этом случае.

## 1. WSTĘP

Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej w elektrociepłowniach zapewnia znaczne zmniejszenie zużycia paliw pierwotnych, a w związku z tym również zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> i innych szkodliwych składników spalin. W elektrociepłowni zużycie paliwa jest większe niż w zastąpionej kotłowni-ciepłowni. Wspomniane pozytywne efekty pojawiają się więc w innych częściach systemu energetycznego, głównie zaś w zastąpionej elektrowni kondensacyjnej, w kopalniach, w systemie transportu paliwa i w zakładach wytwarzających materiały dla kopalni i sieci transportu. Dlatego pozytywne efekty skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej należy oceniać za pomocą wskaźników skumulowanego zużycia energii pierwotnej i skumulowanej emisji CO<sub>2</sub> oraz innych produktów szkodliwych.

Zastosowanie gazu ziemnego w elektrociepłowniach stwarza duże szanse dalszego zwiększenia korzyści energetycznych i ekologicznych [2]. Po pierwsze, pozwala bowiem na stosunkowo łatwe zrealizowanie układów parowogazowych, w których stosunek mocy elektrycznej do mocy ciepła użytecznego jest znacznie większy niż w elektrociepłowniach węglowych. Po drugie, elektrociepłownie na gaz ziemny można budować przy stosunkowo małym zapotrzebowaniu na ciepło, a więc można je zainstalować również w małych miejscowościach dla niezbyt rozległych i przez to tanich sieci ciepłych. Po trzecie, gaz ziemny zapewnia wyraźne zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> i innych składników szkodliwych, dzięki zaś równoczesnemu zwiększeniu oszczędności energii chemicznej występuje zwielokrotnienie korzyści ekologicznych.

## 2. SKUMULOWANE WSKAŹNIKI EFEKTÓW UŻYTECZNYCH

Efekt energetyczny skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej można przedstawić za pomocą stosunku  $\zeta^*$  skumulowanego zużycia energii chemicznej obciążającego produkcję rozdzieloną do skumulowanego zużycia obciążającego produkcję skojarzoną:

$$\zeta^* = \eta_{dg}^* \left( \frac{\beta N_{el}}{W_d} \frac{\eta_{te}}{\eta_{Eel} \eta_{de}^* \eta_{te}^*} + \frac{Q}{W_d} \frac{\eta_{th}}{\eta_k \eta_{dh}^* \eta_{th}^*} \right) \quad (1)$$

Dobór wartości  $\eta_{Eel}$  charakteryzującej zastąpioną elektrownię wynika ze zdolności elektrociepłowni do wytwarzania energii elektrycznej w poszczególnych strefach obciążenia systemu elektroenergetycznego. Ocena wynikająca ze wzoru (1) jest najmniej optymistyczna, jeżeli przyjmie się, że energia elektryczna produkowana w elektrociepłowni zastępuje częściowo energię w podstawowej strefie obciążenia sieci elektroenergetycznej. Wówczas wartość

$\eta_{\text{Eel}}$  dotyczy najbardziej nowoczesnej elektrowni zamykającej bilans zapotrzebowania na energię elektryczną w podstawowej strefie obciążenia. Jeżeli jest to elektrownia paliwowa lub jądrowa, to  $\beta = 1$ . Jeżeli elektrownią zastąpioną jest elektrownia wodna, to  $\beta = 0$ . W krajach takich jak Szwecja budowanie elektrociepłowni nie jest efektywne z punktu widzenia zmniejszenia zużycia paliw. Lepiej jest w takich krajach dostarczać ciepło komunalne za pomocą pomp grzejnych.

Wzór (1) opiera się na założeniu, że ilość ciepła dostarczonego do odbiorców oraz dostarczonej energii elektrycznej jest jednakowa w obu porównywanych systemach. Wielkość  $Q\eta_{\text{th}}$  oznacza ilość ciepła dostarczoną z elektrociepłowni, wielkość zaś  $Q\eta_{\text{th}}/\eta_{\text{th}}$  równoważną ilość ciepła, jaką należy wytworzyć w zastąpionej ciepłowni. Podobnie uwzględniono straty przy transformacji i przesyłaniu energii elektrycznej.

Effekt ekologiczny gospodarki skojarzonej można wyrazić w podobny sposób, jako stosunek  $\rho_i^*$  skumulowanej emisji  $i$ -tego składnika w gospodarce rozdzielonej do skumulowanej emisji w gospodarce skojarzonej:

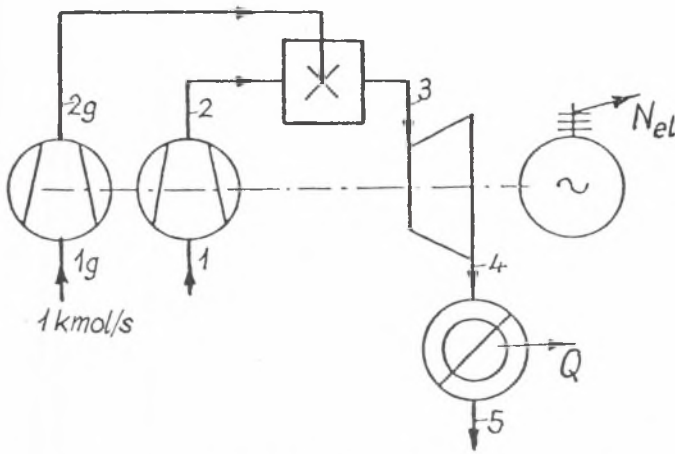
$$\rho_i^* = \frac{\eta_{\text{dg}}^*}{\sigma_{\text{ig}}^*} \left( \sigma_{\text{iel}} \frac{\beta N_{\text{el}}}{W_{\text{d}}} \frac{\eta_{\text{te}}}{\eta_{\text{Eel}} \eta_{\text{de}}^* \eta_{\text{te}}} + \sigma_{\text{ih}} \frac{Q}{W_{\text{d}}} \frac{\eta_{\text{th}}}{\eta_{\text{k}} \eta_{\text{dh}}^* \eta_{\text{th}}} \right) \quad (2)$$

Wskaźnik  $\zeta^*$  można więc wyznaczyć za pomocą wzoru (2) podstawiając w nim  $\sigma_{\text{ig}}^* = \sigma_{\text{iel}} = \sigma_{\text{ih}}$ .

Korzystne skutki skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej są szczególnie wyraźne w zakresie emisji  $\text{CO}_2$ , gdyż  $\sigma_{\text{CO}_2\text{g}} < \sigma_{\text{CO}_2\text{el}}$  i zazwyczaj  $\sigma_{\text{CO}_2\text{g}} < \sigma_{\text{CO}_2\text{h}}$ . Zmniejszenie emisji  $\text{SO}_2$  nie da się wyrazić wzorem (2), gdyż  $\sigma_{\text{SO}_2\text{g}} = 0$ . Można tylko obliczyć wartość występującą w nawiasie wzoru (2). Efekt zmniejszenia emisji  $\text{NO}_x$  można wyznaczyć wzorem (2), jednak zależy on od stosowanych sposobów redukcji tej emisji w zastąpionej elektrowni i ciepłowni. Wartość liczbowa  $\rho^*$  można więc najdokładniej określić dla emisji  $\text{CO}_2$ .

### 3. SCHEMATY ELEKTROCIEPŁOWNI

Na rysunku 1 przedstawiono najprostszy schemat elektrociepłowni turbogazowej wyposażonej w turbinę gazową i wymiennik ciepła, w którym podgrzewa się wodę sieciową. Tego typu elektrociepłownię można zbudować już przy bardzo małym zapotrzebowaniu na ciepło (rzędu 1 MW), jednak znaczne straty energii występujące w wymienniku ciepła zmniejszają uzyskane efekty energetyczne i przyczyniają się do zmniejszenia efektów ekologicznych.



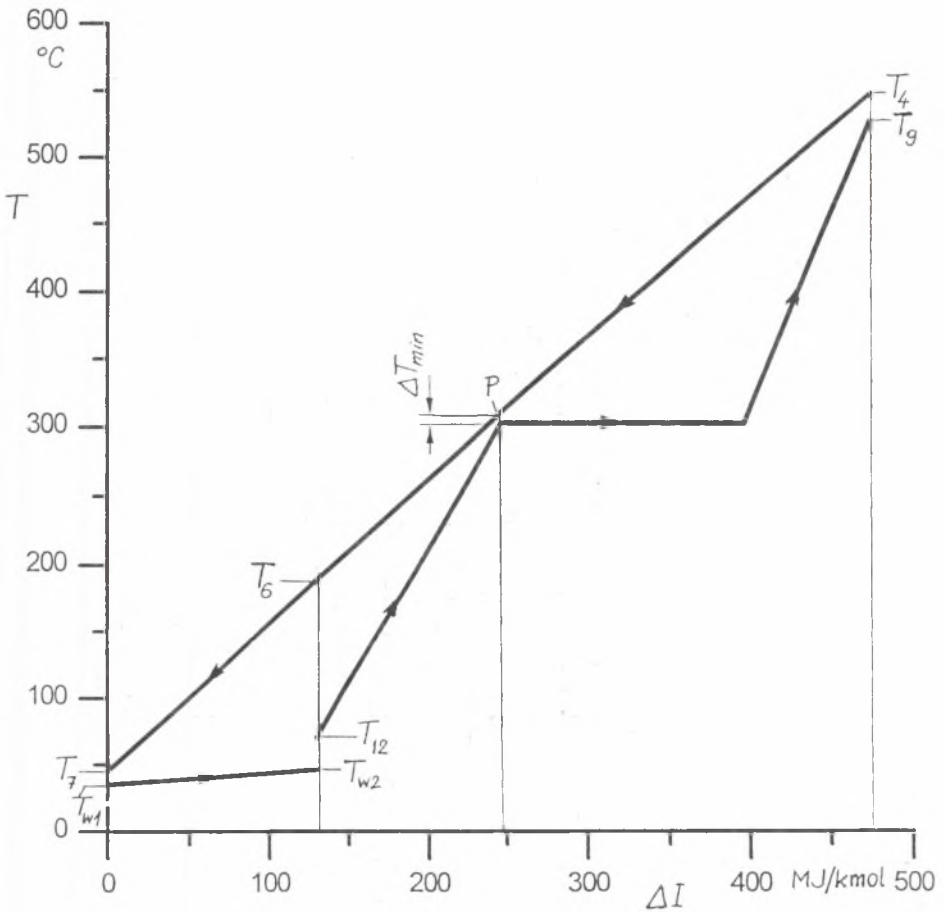
Rys. 1. Schemat prostej elektrociepłowni turbogazowej

Fig. 1. Scheme of a simple gas-turbine cogeneration plant

Na rysunku 2 przedstawiono klasyczną elektrociepłownię parowo-gazową [1, 2] na gaz ziemny, wyposażoną w turbinę gazową, kocioł odzyskowy i turbinę parową przeciwprężną. Minimalna różnica temperatur w kotle odzyskowym występuje przy dopływie wody do parowacza (rys. 3). Jest to punkt przewężenia temperaturowego (pinch point). Ogranicza on możliwość dostatecznego schłodzenia spalin w kotle odzyskowym. Ze względu na niezbyt wysoką temperaturę spalin odpływających z turbiny gazowej nie jest możliwe dostateczne ich schłodzenie w podgrzewaczu wody zasilającej, mimo całkowitej rezygnacji z regeneracyjnego podgrzewania tej wody za pomocą pary upustowej. W celu lepszego wykorzystania entalpii spalin można je skierować (przed odprowadzeniem do komina) do wstępnego podgrzewacza wody sieciowej. Szczytowy podgrzewacz wody sieciowej można zasilać parą z upustu turbiny.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat układu Chenga, cieszącego się ostatnio dużą popularnością [3]. W układzie tym parę z kotła odzyskowego wtryskuje się do spalin przed doprowadzeniem ich do turbiny. Wtryskiwana para zastępuje częściowo nadmiarowe powietrze służące do obniżenia temperatury spalin. Równocześnie zmniejsza się moc napędowa sprężarki powietrza. Produkcja pary w kotle jest jednak energochłonna ze względu na zużycie ciepła na odparowanie wody. Ciepło to należy odzyskać w podgrzewaczu wody sieciowej zasilanym spalinami. W podgrzewaczu tym para wtrysnięta do spalin powinna ulec skropleniu. Dlatego konieczna jest dostatecznie niska temperatura powrotnej wody sieciowej, co można osiągnąć tylko w niskotemperaturowym systemie ogrzewania. Układ Chenga jest tańszy inwestycyjnie od układu





Rys. 3. Rozkład temperatury w kotle odzyskowym i wstępnym podgrzewaczu wody sieciowej

Fig. 3. Temperature distribution in the recovery boiler and preliminary preheater of network water

zapewnia najlepsze wykorzystanie stojącego do dyspozycji gazu ziemnego, który jest drogi i pochodzi w znacznej części z importu.

Przyjęto następujące wartości sprawności składowych:

$$\eta_{iTG} = 0,88; \eta_{iS} = 0,87; \eta_{iTP} = 0,84; \eta_m = 0,98; \eta_g = 0,97; \eta_k = 0,85; \eta_{Eel} = 0,36; \\ \eta_{te} = \eta_{te}; \eta_{th} = 0,90; \eta_{th}^* = 0,95; \eta_{de}^* = \eta_{dh}^* = 0,93; \eta_{dg}^* = 0,98.$$

Przyjęto skład gazu ziemnego:  $CH_4 = 92\%$ ,  $N_2 = 6\%$ ,  $C_2H_6 = 0,7\%$ ,  $C_3H_8 = 0,6\%$ ,  $C_4H_{10} = 0,7\%$  oraz wartość opałową  $778,4 \text{ MJ/kmol}$ . Dla gazu



**Tablica 1**

**Efekty energetyczne i ekologiczne uzyskiwane w elektrociepłowniach turbogazowych i parowo-gazowych na gaz ziemny**

| T <sub>3</sub><br>układ              | 900°C |      | 1000°C |      | 1100°C |      | 1200°C |      |
|--------------------------------------|-------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
|                                      | p*    | k*   | p      | k    | p      | k    | p      | k    |
| p <sub>2</sub> /p <sub>1</sub>       | 7,6   | 7    | 9,8    | 8    | 12,5   | 12   | 15,5   | 18   |
| p <sub>p</sub> , MPa                 | –     | 5    | –      | 9    | –      | 9    | –      | 9    |
| λ                                    | 4,15  | 3,93 | 3,79   | 3,42 | 3,48   | 3,19 | 3,16   | 3,00 |
| N <sub>el</sub> /W <sub>d</sub> , %  | 28,9  | 39,3 | 32,1   | 42,9 | 34,8   | 45,8 | 36,9   | 47,8 |
| N <sub>iTG</sub> /W <sub>d</sub> , % | 63,1  | 64,9 | 69,7   | 65,3 | 75,1   | 74,9 | 77,8   | 83,7 |
| N <sub>iS</sub> /W <sub>d</sub> , %  | 35,2  | 35,8 | 38,7   | 33,7 | 41,5   | 39,4 | 42,1   | 45,4 |
| N <sub>iTP</sub> /W <sub>d</sub> , % | –     | 13,8 | –      | 15,0 | –      | 14,2 | –      | 13,8 |
| Q/W <sub>d</sub> , %                 | 52,6  | 53,9 | 51,5   | 50,3 | 50,6   | 47,2 | 50,1   | 45,0 |
| ζ*                                   | 1,46  | 1,78 | 1,54   | 1,85 | 1,61   | 1,90 | 1,67   | 1,93 |
| ρCO <sub>2</sub>                     | 2,58  | 3,15 | 2,73   | 3,27 | 2,85   | 3,36 | 2,96   | 3,42 |

\* p – prosta elektrociepłownia turbogazowa,  
k – klasyczna elektrociepłownia parowo-gazowa z turbiną parową przeciwpięrzną

## 5. WNIOSKI

1. Elektrociepłownia turbogazowa lub parowo-gazowa na gaz ziemny zapewnia znaczną skumulowaną oszczędność energii chemicznej. Stosunek skumulowanego zużycia energii chemicznej obciążającego produkcję rozdzieloną do skumulowanego zużycia obciążającego produkcję skojarzoną jest wyraźnie większy od jedności, a w elektrociepłowni parowo-gazowej osiąga wartość zbliżoną do 2.
2. Stosunek produkowanej energii elektrycznej do energii chemicznej paliwa jest w elektrociepłowni parowo-gazowej większy niż w nowoczesnych elektrowniach węglowych, a przy dostatecznie wysokiej temperaturze spalin przed turbiną jest nawet większy niż w węglowych elektrowniach parowo-gazowych. Wskazuje to na bardzo dużą efektywność energetyczną elektrociepłowni parowo-gazowej na gaz ziemny.
3. Zastosowanie elektrociepłowni parowo-gazowej na gaz ziemny zmniejsza ponad trzykrotnie emisję CO<sub>2</sub> w porównaniu z układem rozdzielonym, zasilanym węglem. W prostej elektrociepłowni turbogazowej efekt ten jest nieco mniejszy, ale również znaczny.
4. Efekt energetyczny elektrociepłowni parowo-gazowej na gaz ziemny oraz efekt redukcji emisji CO<sub>2</sub> zwiększa się w miarę podwyższania temperatury spalin przy dopływie do turbiny gazowej.



## OZNACZENIA

- $N_{el}$ ,  $Q$  – moc elektryczna i ciepła produkowana w elektrociepłowni na jednostkę strumienia paliwa,  $kW/(kmol/s) = kJ/kmol$ ,  
 $N_{ITG}$ ,  $N_{ITP}$ ,  $N_{IS}$  – moc wewnętrzna turbiny gazowej, turbiny parowej i sprężarki powietrza na jednostkę strumienia paliwa,  $kJ/kmol$ ,  
 $p$  – ciśnienie, MPa,  
 $W_d$  – wartość opałowa paliwa gazowego,  $kJ/kmol$ ,  
 $\beta$  – współczynnik określający rodzaj energii pierwotnej zasila-  
 jącej zastąpioną elektrownię ( $\beta = 1$  dla energii nieodnawial-  
 nej, inaczej  $\beta = 0$ ),  
 $\zeta^*$  – stosunek skumulowanego zużycia energii chemicznej obciążającego produkcję rozdzieloną do skumulowanego zużycia obciążającego produkcję skojarzoną,  
 $\eta_{dg}^*$ ,  $\eta_{de}^*$ ,  $\eta_{dh}^*$  – skumulowana sprawność energetyczna dostawy paliwa do elektrociepłowni, do zastąpionej elektrowni i do zastąpionej ciepłowni,  
 $\eta_{Eel}$  – sprawność energetyczna zastąpionej elektrowni,  
 $\eta_g$  – sprawność generatora elektrycznego,  
 $\eta_k$  – sprawność energetyczna zastąpionej ciepłowni-kotłowni,  
 $\eta_m$  – sprawność mechaniczna,  
 $\eta_{th}$ ,  $\eta_{th}$  – sprawność transportu ciepła z elektrociepłowni i zastąpionej ciepłowni do odbiorców,  
 $\eta_{te}$ ,  $\eta_{te}$  – sprawność transformacji i przesyłania elektryczności z elektrociepłowni i zastąpionej elektrowni,  
 $\rho_i^*$  – stosunek skumulowanej emisji i-tego składnika w produkcji rozdzielonej do skumulowanej emisji w produkcji skojarzonej,  
 $\sigma_{ig}$ ,  $\sigma_{iel}$ ,  $\sigma_{ih}$  – współczynnik emisji i-tego składnika spalin z elektrociepłowni, zastąpionej elektrowni i zastąpionej ciepłowni, na jednostkę energii chemicznej paliwa,  $kmol/MJ$ ,  
 $\lambda$  – stosunek nadmiaru powietrza.

## WSKAŹNIKI

- $e$  – energia elektryczna,  
 $el$  – elektrociepłownia lub elektrownia,  
 $g$  – paliwo gazowe,  
 $h$  – ciepło lub ciepłownia,  
 $S$  – sprężarka,  
 $TG$  – turbina gazowa,  
 $TP$  – turbina parowa,  
 $*$  – wskaźnik skumulowany.

## LITERATURA

- [1] First GE LH 6000 Gas Turbine Enters Operation in Canadian Cogeneration Plant. Diesel & Gas Turbine Worldwide, 25 (1993), No 4, str. 70-71.
- [2] Forss M.K.: Present State and Future Prospects of Natural Gas-Based CHP Technologies. NGC News, 1991, No 12, str. 1-3.
- [3] Staarup M., Nielsen A.: Cheng-Cycle – an Economically and Environmentally Correct Alternative. NGC News, 1991, No 12, str. 4-5.
- [4] Szargut J.: Efektywność energetyczna elektrociepłowni turbogazowej. Energetyka (1994), nr 11.
- [5] Szargut J., Szlęk A.: Małe elektrociepłownie parowo-gazowe na gaz ziemny. Energetyka (w druku).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Ziębik

Wpłynęło do Redakcji: 23. 02. 1995 r.

**Abstract**

Indices have been defined characterising the cumulative economy of chemical energy and cumulative reduction of CO<sub>2</sub>-emission due to the introduction of cogeneration plants equipped with gas turbine or gas- and steam-turbine. Energy effects have been expressed by means of the ratio of cumulative consumption of chemical energy in a separate production system to that appearing in the cogeneration system. Similarly the ecological effects represents the coefficient expressing the ratio of cumulative emission of CO<sub>2</sub> in a separate and cogeneration system. Exemplary calculations have been performed for two kinds of the cogeneration plant fed with natural gas: the classical one, equipped with gas- and steam-turbine, and a simple one equipped with gas turbine only. It has been assumed, that the separate production system consists of the modern power plant fed with coal and having the energy efficiency 0,36 and the boiler house fed with coal and having the energy efficiency 0,85. The compression ratio of air in both analysed plants has been thermodynamically optimized by means of the above mentioned index expressing the cumulative energy effects. Optimal values of this index increase with increasing temperature of the combustion gases before the gas turbine. These optimal values are between 1,5 and 1,7 for the simple system and between 1,8 and 1,9 for the classical system. The ecological index has the values between 2,6 and 3 for a simple system and

between 3,15 and 3,4 for the classical system. In the classical system at sufficiently high temperature of combustion gases before the gas turbine, the ratio of electrical power to the power of consumed chemical energy is greater than in modern power plants fed with coal.