

Prof. dr hab. inż. Ryszard Bartnik,
Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, Politechnika Opolska

Dr inż. Tomasz Kowalczyk,
Zakład Konwersji Energii, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk

Efektywność termodynamiczna i ekonomiczna innovacyjnych hierarchicznych gazowo-gazowych elektrowni jądrowych

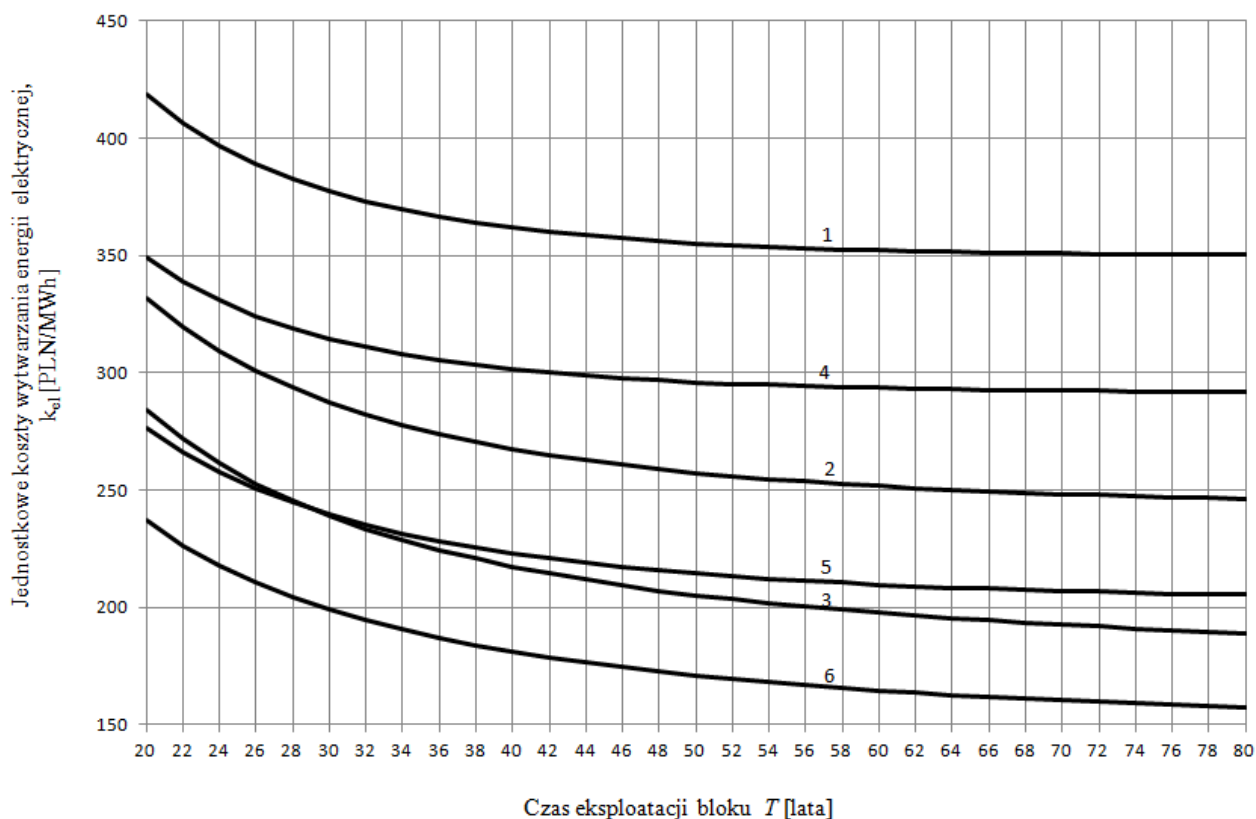
z wysokotemperaturowym reaktorem i helem jako
czynnikami obiegowym

Budowa energetyki jądrowej jest bezwzględnie konieczna i to z wielu powodów. (1) Jest przyjazna środowisku, jest bowiem bezemisyjnym źródłem elektryczności. Nie emituje w ogóle pyłów, związków siarki, azotu, dwutlenku węgla. (2) Zapewnia przy tym, co szalenie ważne, stabilne zasilanie odbiorców w energię elektryczną przez cały rok. W energię, bez której współczesna cywilizacja nie może istnieć. Roczny czas wykorzystania mocy elektrowni jądrowych przekracza bowiem 8000 h (należy przypomnieć, że rok liczy 8760 h). (3) Co więcej, paliwa jądrowego: uranu, plutonu i toru wystarczy na wiele setek lat, gdy natomiast zasoby węgla i gazu w coraz szybszym tempie się wyczerpują.

Mało tego, po wprowadzeniu cyklu zamkniętego z wielokrotnym wykorzystaniem paliwa jądrowego (tzw. reakcje powielania paliwa) wystarczy go na dziesiątki tysięcy lat. Ponadto w wodzie morskiej rozpuszczone są ponad 4 mld ton uranu, którego techniczne wydobycie jest opanowane. Paliwa jądrowego wystarczy zatem na mld lat. (4) Okres eksploatacji elektrowni jądrowych jest przy tym długi, wynosi co najmniej 60 lat. (5) Cena elektryczności z elektrow-

ni jądrowych, w których realizowany jest obieg Clausiusa-Rankine'a jest zatem relatywnie niska (rys. 1). Jak wynika z rys. 1 jednostkowy koszt produkcji w nich energii elektrycznej dla wartości stopy $r = 3\%$ (oraz oczywiście i niższych) i dla czasu eksploatacji $T = 60$ lat (czas ten jest obecnie normą dla bloków jądrowych) wynosi poniżej 200 PLN/MWh, a więc jest istotnie mniejszy od kosztów uzyskiwanych w pozostałych technologiach energetycznych [5]. Gdyby nato-

miast należało spłacić kredyt o oprocentowaniu $r = 3\%$ w okresie nie $T = 60$ lat, a lat $T = 20$, to wówczas cena sprzedaży energii elektrycznej musiałaby wynosić powyżej ok. 280 PLN/MWh dla jednostkowych (na jednostkę mocy) nakładów inwestycyjnych $i = 18$ mln PLN/MW oraz powyżej ok. 240 PLN/MWh dla jednostkowych nakładów inwestycyjnych $i = 15$ mln PLN/MW - rys. 1 (dla stopy $r = 8\%$ oraz $i = 18$ mln PLN/MW cena ta musiałaby być wyższa od 419 PLN/MWh). Po



Rys. 1. Jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni jądrowej pracującej według obiegu Clausiusa-Rankine'a w funkcji czasu eksploatacji bloku T dla jednostkowych nakładów inwestycyjnych i oraz stopy dyskonta r jako parametrów: 1 - $i = 18$ mln PLN/MW, $r = 8\%$, 2 - $i = 18$ mln PLN/MW, $r = 5\%$, 3 - $i = 18$ mln PLN/MW, $r = 3\%$, 4 - $i = 15$ mln PLN/MW, $r = 8\%$, 5 - $i = 15$ mln PLN/MW, $r = 5\%$, 6 - $i = 15$ mln PLN/MW, $r = 3\%$

okresie T lat, czyli gdy elektrownia jest już zamortyzowana, jednostkowy koszt produkcji energii elektrycznej wynosi już tylko 115 PLN/MWh [5, 9].

(6) Koszt paliwa jądrowego w rocznych kosztach działania elektrowni jądrowych stanowi zaledwie ok. 5% tych kosztów. Tym samym, w przeciwieństwie do elektrowni węglowych (koszt węgla stanowi ok. 35% rocznych kosztów ich działania), a zwłaszcza gazowych (koszt gazu w elektrowniach gazowo-parowych dochodzi nawet do 75% rocznych kosztów ich działania), cena elektryczności z atomu jest mało wrażliwa na koniunkturalne zmiany ceny uranu. Nawet zatem bardzo znaczny jej wzrost w znikomym stopniu spowoduje wzrost ceny elektryczności.

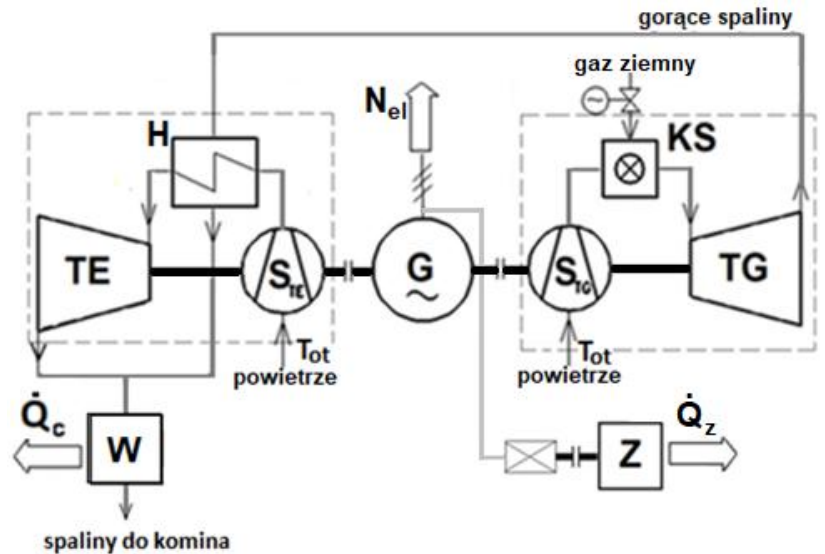
Termodynamicznym „mankamentem” stosowania konwencjonalnych elektrowni jądrowych, tj. elektrowni

w których realizowany jest obieg *Clausiusa-Rankine'a* są pracujące w niektórych z nich reaktory wodne. W wyniku tego stosunkowo niska jest sprawność netto wytwarzania w nich energii elektrycznej nie przekraczająca 34%. Dzięki jednak trwającemu już od kilkunastu lat rozwojowi reaktorów gazowych wysokotemperaturowych (HTGR - *High Temperature Gas-cooled Reactor*) problem ten został rozwiązany. Będące obecnie już 3. pokoleniem tych reaktorów reaktory gazowe z heliem jako chłodziwem rdzenia reaktora oraz z grafitem jako moderatorem pozwalają na budowę elektrowni jądrowych, w których realizowany jest obieg *Clausiusa-Rankine'a* turbiny parowej z nadkrytycznymi parametrami pary, a więc o sprawnościach rzędu 45%. Temperatura bowiem wylotowa helu z rdzenia reaktora wynosi ponad 1000°C ($T_2 \approx 1300$ K, rys. 3), a więc uzyskanie

dzięki temu parametrów pary doprowadzanej do turbiny parowej na poziomie ponad 600°C nie jest już problemem. Hel charakteryzuje się ponadto dobrymi właściwościami odprowadzania ciepła oraz małym przekrojem czynnym na wychwyt neutronów, a także, co ze względów bezpieczeństwa jądrowego jest szczególnie ważne, brakiem aktywności.

Z uwagi na powyższe, w pracy poddano analizie termodynamicznej i ekonomicznej elektrownię jądrową z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym HTGR i heliem jako czynnikiem obiegowym. Co najważniejsze, analizie poddano elektrownię pracującą nie według obiegu *Clausiusa-Rankine'a*, a według hierarchicznego układu gazowo-gazowego. W układzie tym realizowane są dwa obiegi *Joule'a*. Jeden w turbosprężarce wysokociśnieniowym TE_w w zakresie temperatur wysokich i drugi

w turboekspanderze niskociśnieniowym TE_n w zakresie temperatur niskich (stąd pojęcie hierarchii) - rys. 3, 4, 5. Fundamentalną właściwością silników hierarchicznych jest to, że doprowadzanie do nich ciepła z zewnętrznego źródła ma miejsce wyłącznie do obiegu stojącego w hierarchii najwyżej, tj. do obiegu pracującego w zakresie najwyższych temperatur. W rozważanym przypadku jest to wspomniany obieg *Joule'a* turboekspandera wysokociśnieniowego TE_w . Do każdego z pozostałych obiegów ciepło do nich doprowadzane jest ciepłem wyrowadzonym z obiegów znajdujących się w hierarchii zaraz powyżej nich. W analizowanym przypadku jest to zatem ciepło doprowadzane do obiegu TE_n z obiegu TE_w . Odbyna się to w wymienniku ciepła H , który sprzęga oba obiegi (rys. 3, 4, 5). Co najważniejsze, w silnikach hierarchicznych sprawność konwersji energii chemicznej paliwa na pracę mechaniczną jest istotnie większa od sprawności uzyskiwanej w silnikach jednoobiegowych. Jest tak dlatego, gdyż w układach tych wykorzystywany jest istotnie większy zakres temperatur z przedziału $\langle T_g; T_{ot} \rangle$, tj. z przedziału pomiędzy temperaturą górnego źródła ciepła T_g i temperaturą otoczenia T_{ot} , które stanowi dolne źródło ciepła. W najdoskonalszym termodynamicznie, teoretycznym silniku *Carnota* o największej teoretycznie możliwej mocy mechanicznej wykorzystywany jest cały zakres $\langle T_g; T_{ot} \rangle$. Im większa będzie zatem w układzie hierarchicznym liczba obiegów mających różne temperaturowe zakresy pracy, w tym większym stopniu będzie wykorzystywany w nim zakres $\langle T_g; T_{ot} \rangle$. Tym samym mniejsze będą w układzie straty strumienia energii, a więc tym większa będzie jego moc. W granicy, gdy liczba obiegów j dąży do nieskończoności, $j \rightarrow \infty$, to różnica pomiędzy sprawnością η_c teoretycznego silnika *Carnota* i sprawnością silnika hierarchicznego η_{1-j} zanika, $\eta_c - \eta_{1-j} \rightarrow 0$ i moc mechaniczna silnika hierarchicznego równa się mocy teoretycznego silnika *Carnota*, a więc mocy maksymalnej możliwej dzięki wykorzystywaniu, tak jak



Rys. 2. Schemat ideowy hierarchicznego trójgeneracyjnego układu gazowo-gazowego z turbiną gazową i turboekspanderem niskociśnieniowym w konfiguracji jednowalowej; zespół turbiny gazowej TG + S_{TG} z zespołem turboekspandera niskociśnieniowego TE + S_{TE} osadzone są na wspólnym wale i napędzają jeden wspólny generator G; KS - komora spalania turbiny gazowej, H - wymiennik ciepła, S_{TG} , S_{TE} - sprężarki wysoko- i niskociśnieniowa, W - wymiennik ciepłowniczy, Z - zbiornik sprężarkowa (w przypadku elektrowni wymiennik ciepłowniczy W i zbiornik Z oczywiście nie występują)

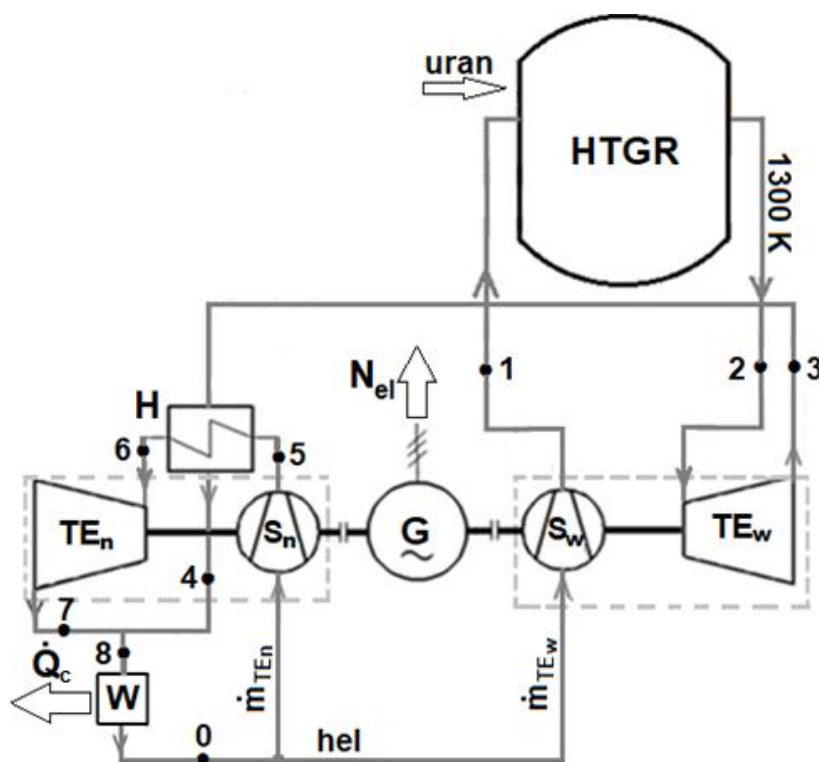
w silniku *Carnota*, całego zakresu temperatur $\langle T_g; T_{ot} \rangle$ [6, 9].

Poddany w pracy analizie termodynamicznej i ekonomicznej hierarchiczny układ elektrowni jądrowej z dwoma turboekspanderami jest istotną modyfikacją przedstawionych w [1, 2] hierarchicznych silników gazowo-gazowych, w których stosowane są turbiny gazowe i turboekspandery niskociśnieniowe - rys. 2 (silnik ten chroniony jest patentem [7]). Na rys. 2. przedstawiono trójgeneracyjną pracę takiego silnika.

Zastąpienie w silnikach gazowo-gazowych [1, 2] turbiny gazowej reaktorem *HTGR* i turboekspanderem wysokociśnieniowym oraz helum jako czynnikiem obiegowym (rys. 3), pozwala istotnie obniżyć koszty działania elektrowni jądrowej w porównaniu z elektrownią, w której realizowany jest obieg *Clausiusa-Rankine'a*. Hel ma bowiem tę istotną przewagę nad spalinami i powietrzem, które są czynnikami obiegowymi kolejno w turbinie gazowej i turboekspanderze niskociśnieniowym w układzie na rys. 2, gdyż jego pojemność ciepl-

na jest ok. 5 razy większa. Pojemność cieplna właściwa helu przy stałym ciśnieniu wynosi bowiem $c_{p, He} = 5,234$ kJ/(kgK), gdy natomiast dla spalin w turbinie gazowej i powietrza wynosi tylko $c_{p, pow} \approx c_{p, sp} \approx 1,0$ kJ/(kgK) (stosunek strumieni masy gazu ziemnego \dot{m}_{gaz}^{TG} i powietrza \dot{m}_{pow}^{KS} doprowadzanych do komory spalania turbiny gazowej wynosi zaledwie ok. $\dot{m}_{gaz}^{TG} / \dot{m}_{pow}^{KS} \approx 2 \div 3\%$ i dlatego można założyć, że $c_{p, pow} \approx c_{p, sp}$, gdyż spaliny to niemalże „czyste” powietrze). Dlatego strumień masy helu w obiegu turboekspandera przy takich samych mocach jest ponad 5-krotnie mniejszy, a tym samym i ich gabaryty są wielokrotnie mniejsze od gabarytów turbiny gazowej i turboekspandera w układzie przedstawionym na rys. 2, co przekłada się na zdecydowanie niższe nakłady inwestycyjne na elektrownię z rys. 3. Należy przy tym, co szalenie ważne, bardzo mocno podkreślić, że w przypadku elektrowni gazowo-gazowych „odpadają” także bardzo istotne problemy i koszty eksploatacyjne związane z gospodarką wodną obiegu

parowego *Clausiusa-Rankine'a*. Elektrownie jądrowe gazowo-gazowe mogą zatem powstawać również i tam, gdzie nie ma wody. W konsekwencji, co należy kolejny raz bardzo mocno podkreślić, jednostkowe nakłady inwestycyjne na elektrownię atomową w hierarchicznej technologii gazowo-gazowej (rys. 3) i koszty jej eksploatacji będą bardzo istotnie mniejsze od kosztów eksploatacji i nakładów na konwencjonalną elektrownię jądrową, w której realizowany jest obieg *Clausiusa-Rankine'a*. Tym samym i jednostkowy koszt produkcji w niej energii elektrycznej będzie również bardzo istotnie mniejszy (rys. 11). Zakładając na przykład jednostkowe nakłady na poziomie 12 mln PLN/MW (głównym składnikiem tych nakładów będą nakłady na reaktor, gdy w układzie konwencjonalnym, tj. z obiegiem *Clausiusa-Rankine'a* równie bardzo istotnym składnikiem są nakłady na część parową elektrowni atomowej), to jednostkowy koszt produkcji energii elektrycznej w elektrowni gazowo-gazowej będzie bardzo istotnie mniejszy w całym zakresie T lat jej eksploatacji w porównaniu z kosztami przedstawionymi na rys. 1. Na przykład dla standardowego czasu eksploatacji bloku jądrowego $T = 60$ lat oraz dla stopy oprocentowania kapitału inwestycyjnego równej nawet $r = 5\%$ będzie istotnie mniejszy od 200 PLN/MWh (rys. 11). Elektrownia jądrowa w układzie gazowo-gazowym będzie zatem źródłem energii elektrycznej o najniższym jednostkowym koszcie jej wytwarzania. Będzie on mniejszy o co najmniej kilkadziesiąt procent (sic!) od kosztów uzyskiwanych we wszystkich innych możliwych obecnie technologiach energetycznych wykorzystujących paliwa kopalne [5]. W porównaniu natomiast z jednostkowymi kosztami produkcji energii elektrycznej w odnawialnych źródłach energii (OZE), charakteryzujących się bardzo dużą nieprzewidywalnością czasową i bardzo krótkimi rocznymi czasami pracy, będzie mniejszy wielokrotnie [5]. Jeśli za-



Rys. 3. Schemat ideowy elektrowni jądrowej gazowo-gazowej z turbosprężarkami wysokociśnieniowym TE_w i niskociśnieniowym TE_n oraz z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym HTGR i helium jako jedynym czynnikiem obiegowym (w przypadku elektrowni strumień ciepła Q_c jest wyprowadzany nie do sieci ciepłowniczej, a do otoczenia)

tem chcemy mieć energetykę bezemisyjną i tanią energię elektryczną przez cały rok, tj. przez 8760 h, to należy budować inwestycyjnie tanie elektrownie jądrowe w układzie gazowo-gazowym pracujące w podstawie obciążenia systemu elektroenergetycznego.

W miejskich systemach ciepła sieciowego Q_c mogą być wykorzystywane reaktory HTGR o relatywnie małych mocach cieplnych.

Mówiąc o energetyce jądrowej kilku słów wymaga także energetyka, która miałaby bazować na fuzji termojądrowej. Czy jednak prace prowadzone nad jej technicznym opanowaniem zostaną uwieńczone sukcesem? Jeśli tak, to wówczas ludzkość będzie dysponowała niewyczerpanym źródłem „czystej” energii. Od lat 50. ub. w. styszymy jednak wyłącznie, że jest już blisko i cią-

gle nic. Czy zatem w ogóle to nastąpi, czy jest bowiem możliwa kontrolowana ingerencja techniczna człowieka w strukturę atomu? W przypadku bowiem reakcji jądrowej ma miejsce jedynie kontrola liczby rozbijanych jąder i proces ten odbywa się na zewnątrz samych atomów poprzez ograniczanie liczby neutronów je bombardujących dzięki stosowaniu prętów regulacyjnych. Możliwość kontrolowanej ingerencji człowieka w strukturę budowy atomu dawałaby nieprawdopodobne, wręcz niewyobrażalne możliwości. Możliwość tworzenia nowej rzeczywistości, tworzenia nowego świata, zarówno w wymiarze fizycznym, jak i duchowym. Jakie byłyby tego konsekwencje? Czy dotyk Midasa zamieniający wszystko w złoto nie stałby się wówczas rzeczywistym przeobrażeniem?

■ Analiza termodynamiczna hierarchicznej gazowo-gazowej elektrowni jądrowej z wysokotemperaturowym reaktorem i helem jako czynnikiem obiegowym

Moc elektryczna hierarchicznej gazowo-gazowej elektrowni jądrowej z wysokotemperaturowym reaktorem i helem jako czynnikiem obiegowym (rys. 3) wyraża się wzorem 1:

$$N_{el} = N_{TE_w} + N_{TE_n} = \left[(N_{i\exp} - N_{iS})_{TE_w} + (N_{i\exp} - N_{iS})_{TE_n} \right] \eta_G = \left\{ \dot{m}_{TE_w} c_{p,He} \left[\eta_m (T_2 - T_3) - \frac{1}{\eta_m} (T_1 - T_0) \right] + \dot{m}_{TE_n} c_{p,He} \left[\eta_m (T_6 - T_7) - \frac{1}{\eta_m} (T_5 - T_0) \right] \right\} \eta_G \quad (1)$$

gdzie:

$c_{p,He}$ - pojemność cieplna właściwa helu przy stałym ciśnieniu; $c_{p,He} = 5,234 \text{ kJ}/(\text{kgK})$,
 $\dot{m}_{TE_n}, \dot{m}_{TE_w}$ - strumienie masy helu,
 $N_{i\exp}, N_{iS}$ - moce turboekspandera i sprężarki,
 $T_0, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7$ - temperatury,
 η_G - sprawność generatora elektrycznego,
 η_m - sprawności mechaniczne (założono, że sprawności mechaniczne sprężarek i turboekspanderek są takie same).

We wzorze (1) temperatura T_2 jest zdeterminowana maksymalną możliwą temperaturą helu wylotowego z reaktora chłodzącego jego rdzeń. Temperatura ta wynosi ok. 1300 K. Także strumień helu \dot{m}_{TE_w} doprowadzany do turboekspandera wysokociśnieniowego jest zdeterminowany. Wynika on z założonej mocy cieplnej reaktora \dot{Q}_{HTGR} :

$$\dot{m}_{TE_w} = \frac{\dot{Q}_{HTGR}}{c_{p,He} (T_2 - T_1)} \quad (2)$$

Istotnym problemem jest natomiast znalezienie odpowiedzi na pytanie: jaką wartość powinien mieć strumień masy helu \dot{m}_{TE_n} doprowadzany do turboekspandera niskociśnieniowego? Powinien on oczywiście gwarantować maksymalną

jego moc N_{TE_n} . Moc ta będzie tym większa im większy będzie strumień \dot{m}_{TE_n} , a także im większa będzie wartość temperatury T_6 (wzór (1)). Należy jednak zaznaczyć, że wzrost strumienia \dot{m}_{TE_n} powoduje obniżenie temperatury T_6 , a tym samym i obniżenie sprawności energetycznej η_{TE_n} obiegu *Joule'a* turboekspandera niskociśnieniowego (rys. 5, 8). Najwyższą wartość sprawność osiągnęłaby gdyby $T_6 = T_3$. Jest to jednak oczywiście niemożliwe, bowiem wówczas powierzchnia przeciwnądowego wymiennika ciepła H , który sprzęga obieg turboekspandera wysokociśnie-

niowego z obiegiem turboekspandera niskociśnieniowego (rys. 3), musiałaby być nieskończenie wielka. Przy zmiennej powierzchni wymiany ciepła im większy jest strumień \dot{m}_{TE_n} , tym mniejsza jest, co oczywiste, wartość temperatury helu T_6 . Ponadto z analizy rozkładów temperatur czynników w wymienniku H wynika, że im większa jest wartość strumienia masy \dot{m}_{TE_n} ponad wartość strumienia \dot{m}_{TE_w} , tym większa jest wartość $\Delta T_1 = T_3 - T_6$ od wartości $\Delta T_2 = T_4 - T_5$. I odwrotnie. Jeżeli $\dot{m}_{TE_n} < \dot{m}_{TE_w}$, to w tym większym stopniu zachodzi nierówność $\Delta T_1 = T_3 - T_6 < \Delta T_2 = T_4 - T_5$ w im większym stopniu strumień \dot{m}_{TE_n} jest mniejszy od \dot{m}_{TE_w} . Wreszcie gdy $\dot{m}_{TE_n} = \dot{m}_{TE_w}$, to $\Delta T_1 = T_3 - T_6 = \Delta T_2 = T_4 - T_5$.

W pracy do obliczeń termodynamicznych i opłacalności ekonomicznej pracy elektrowni przyjęto, że $\dot{m}_{TE_n} = \dot{m}_{TE_w}$. Założenie takie jest uprawnione, gdyż z bilansu energii wymiennika H (po pominięciu w nim strat ciepła przez powierzchnię boczną wymiennika do otoczenia) wynika, że iloraz pojemności cieplnych \dot{C}_{TE_n} , \dot{C}_{TE_w} strumieni czynników jest bliski jedności. Wartości ΔT_1 i ΔT_2 w porównaniu z różnicą $T_3 - T_5$ są bowiem relatywnie małe:

$$\frac{\dot{C}_{TE_n}}{\dot{C}_{TE_w}} = \frac{\dot{m}_{TE_w} c_{p,He}}{\dot{m}_{TE_n} c_{p,He}} = \frac{T_3 - T_4}{T_6 - T_5} = \frac{T_3 - T_5 - \Delta T_2}{T_3 - T_5 - \Delta T_1} \cong 1 \quad (3)$$

Należy również zauważyć, że przyjęcie równości strumieni mas helu $\dot{m}_{TE_n} = \dot{m}_{TE_w}$ nie spowoduje także znaczącej różnicy w wynikach obliczeń opłacalności ekonomicznej pracy elektrowni w porównaniu z sytuacją, gdyby strumienie te były różne, $\dot{m}_{TE_n} \neq \dot{m}_{TE_w}$. Z różniczki:

$$dN_{TE_n} = \frac{\partial N_{TE_n}}{\partial \dot{m}_{TE_n}} d\dot{m}_{TE_n} + \frac{\partial N_{TE_n}}{\partial T_6} \Delta T_6, \quad (4)$$

gdzie pochodna substancjalna $\partial N_{TE_n} / \partial T_6$ wyraża się równaniem (patrz wzory (1) i (17)):

$$\frac{\partial N_{TE_n}}{\partial T_6} = \frac{\partial N_{TE_n}}{\partial T_6} + \frac{\partial N_{TE_n}}{\partial T_7} \frac{dT_7}{dT_6} + \frac{\partial N_{TE_n}}{\partial z_{TE_n}^{opt}} \frac{dz_{TE_n}^{opt}}{dT_6} \quad (5)$$

wynika bowiem, że przyrost wartości mocy $\Delta N_{TE_n}(T_6) = \frac{\partial N_{TE_n}}{\partial T_6} \Delta T_6$ ze zmianą

temperatury T_6 o każdy jeden stopień jest niewielki i wynosi co najwyżej kilka promili mocy N_{TE_n} . Co więcej, jest niemalże identyczny z wartością przyrostu

$$\Delta N_{TE_n}(\dot{m}_{TE_n}) = \frac{\partial N_{TE_n}}{\partial \dot{m}_{TE_n}} \Delta \dot{m}_{TE_n} \text{ odpowia-}$$

dającego zmianie strumienia masy \dot{m}_{TE_n} o każdy jeden kg/s. Co najważniejsze, jak już zaznaczono, przyrost strumienia \dot{m}_{TE_n} powoduje obniżenie temperatury T_6 , a więc przyrosty mocy $\Delta N_{TE_n}(\Delta \dot{m}_{TE_n})$ i $\Delta N_{TE_n}(\Delta T_6)$ mają przeciwne znaki i się zatem niemalże znoszą. Tym samym sumaryczny przyrost mocy N_{TE_n} ze zmianami \dot{m}_{TE_n} i T_6 jest prawie zerowy, jest więc pomijalny. Co więcej, pomijając go można również i dlatego, gdyż moc N_{TE_n} stanowi zaledwie ok. 16% mocy N_{TE_w} (rys. 10) i zatem w relatywnie małym stopniu wpływa na zmianę mocy N_{el} (wzór (1)). Z uwagi na powyższe można więc *expressis verbis* powiedzieć, że przyjęcie założenia, że jest $\dot{m}_{TE_n} = \dot{m}_{TE_w}$ całkowicie uzasadnione.

Ostatecznie jednak wartość strumienia \dot{m}_{TE_n} powinna wynikać z analizy ekonomicznej, tj. z maksymalizacji zysku osiąganego z pracy turboekspandera niskociśnieniowego, w której głównymi zmiennymi podlegającymi optymalizacji powinny być: powierzchnia i nakłady finansowe na przeciwprądowy wymiennik ciepła H oraz różnica temperatur $T_3 - T_6$, od której zależą sprawność η_{TE_n} i moc N_{TE_n} . Maksimum zysku osiąganego z pracy elektrowni, przy jej zadanej mocy, jest równoznaczne ze znalezieniem minimum rocznych kosztów produkcji w niej energii elektrycznej. Znalezienie minimum sumy kosztów kapitałowych i eksploatacyjnych powinno być zatem końcową funkcją celu w optymalizacji jej pracy. Napotyka to jednak na duże trudności, gdyż w obliczeniach na etapie wstępnej analizy ekonomicznej opłacalności budowy i eksploatacji elektrowni szacunkowe nakłady inwestycyjne na nią zwiększane są dodatkowo o 8÷10% na tzw. nieprzewidziane wydatki. Wprowadza to dodatkowe koszty kapitałowe i związane z nimi dodatkowe przyrosty kosztów eksploatacyjnych, a tym samym „falszuje” (pogarsza) wyniki analizy. W konkretnym przypadku szczegółowa analiza ekonomiczna, uwzględniająca już kontraktowe nakłady inwestycyjne, również byłaby obciążona pewnym błędem, tym razem w wyniku założonego rocznego czasu pracy elektrowni. W praktyce eksploatacyjnej czas pracy elektrowni może się bowiem znacznie różnić od założonego, co ma zasadnicze znaczenie na opłacalność ekonomiczną. Co więcej, a w zasadzie przede wszystkim, ustalenie nakładów inwestycyjnych, a tym samym i kosztów kapitałowych pracy elektrowni w funkcji termodynamicznych parametrów \dot{m}_{TE_n} i T_6 jest bardzo trudne, aby nie powiedzieć, że wręcz niemożliwe. Analiza ekonomiczna zatem jej eksploatacji w oparciu o obciążone dużym przybliżeniem i dużą niepewnością nakłady inwestycyjne byłaby więc obciążona także dużym błędem. Z uwagi na powyższe, chociaż kryterium ekonomiczne jest nadrzędne dla kryterium

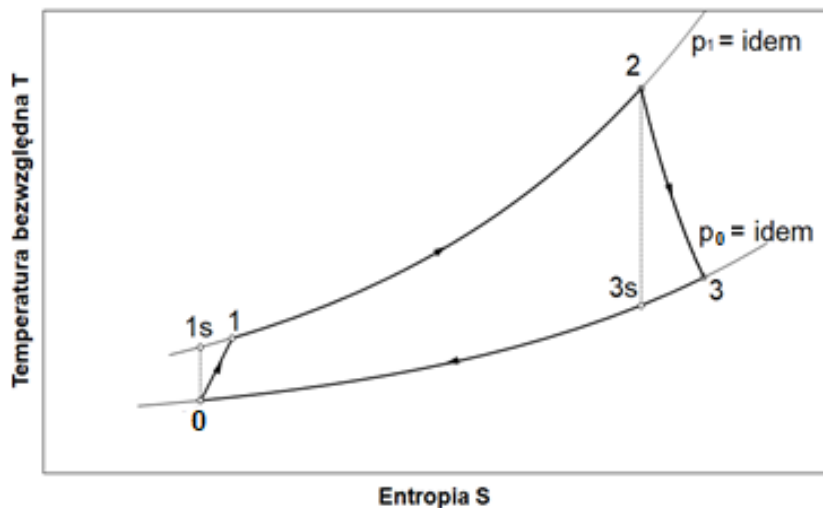
termodynamicznego, jak również z powodu niepewności przewidywania zmian cen nośników energii spowodowanych inflacją w okresie eksploatacji elektrowni, należy w obliczeniach optymalizacyjnych jej pracy posłużyć się kryterium technicznym, kryterium maksimum mocy turboekspandera niskociśnieniowego N_{TE_n} (moc turboekspandera wysokociśnieniowego N_{TE_w} jest z góry zdeterminowana zadaną mocą cieplną reaktora \dot{Q}_{HTGR} i daną temperaturą $T_2 \approx 1300$ K) - wzory (1) i (2). Jest jednak możliwe pewne wyjście, aby w obliczeniach optymalizacyjnych parametrów termodynamicznych \dot{m}_{TE_n} i T_6 można było posłużyć się kryterium ekonomicznym w sytuacji niemożności ustalenia nakładów inwestycyjnych w funkcji tych parametrów. Można wówczas zastosować metodę przyrostową, tj. ustalić dopuszczalne graniczne wartości przyrostów nakładów inwestycyjnych dla przyrostów parametrów termodynamicznych \dot{m}_{TE_n} i T_6 , przy których efektywność ekonomiczna pracy elektrowni nie będzie jeszcze malała. Otrzymane wyniki obliczeniowe zawierać się jednak będą wówczas w przedziałach, nie będą zatem ściśle jednoznaczne, a zatem ich wartość będzie mniejsza od wyników uzyskanych drogą termodynamiczną. Ponadto nie otrzyma się ogólnego charakteru obra-

zu wpływu zmian parametrów \dot{m}_{TE_n} i T_6 na np. charakterystyki mocy. Tym samym, obok małej wartości poznawczej, również wartość praktyczna takich wyników będzie relatywnie mała. Z uwagi na powyższe konieczna jest analiza termodynamiczna silnika gazowo-gazowego, by znaleźć jego największą sprawność energetyczną [(wzór (18))].

Fundamentalną wielkością decydującą o sprawności energetycznej turboekspandera wysokociśnieniowego η_{TE_w} i jego mocy N_{TE_n} jest temperatura T_2 , natomiast o sprawności η_{TE_n} i mocy N_{TE_n} turboekspandera niskociśnieniowego decyduje temperatura T_6 . Sprawności η_{TE_w} i η_{TE_n} wyznacza się za pomocą bilansów energii obiegów *Joule'a* w nich realizowanych (rys. 4, 5).

Z bilansu energii obiegu *Joule'a* turboekspandera wysokociśnieniowego otrzymuje się:

$$\eta_{TE_w} = \frac{N_{TE_w}}{\dot{Q}_d} = \frac{N_{i,exp} - N_{i,s}}{\dot{Q}_d} = \frac{\eta_m(T_2 - T_3) - \frac{1}{\eta_m}(T_1 - T_0)}{T_2 - T_1} = \frac{\eta_m^2 \eta_i^s \eta_i^{TE_w} T_2 \left(1 - \frac{1}{z_{TE_w}}\right) - T_0(z_{TE_w} - 1)}{\eta_m \eta_i^s (T_2 - T_0) - \eta_m T_0 (z_{TE_w} - 1)} \rightarrow \max \quad (6)$$



Rys. 4. Obieg Joule'a turboekspandera wysokociśnieniowego

W przypadku turboekspandera wysokociśnieniowego $\dot{Q}_d = \dot{Q}_{HTGR}$ [(patrz wzór (2)]. Sprawność η_{TE_w} jest tym większa, im większa jest temperatura T_2 . Temperaturę tę, jak już zaznaczono, „narzuca” temperatura helu wylotowego z reaktora $T_2 \approx 1300$ K. Również im wyższa jest temperatura T_6 tym wyższa będzie sprawność η_{TE_n} turboekspandera niskociśnieniowego.

Kończącą postać wzoru (6) otrzymuje się po podstawieniu do niego temperatur wynikających z adiabat nieodwracalnych 0-1 oraz 2-3 (rys. 4):

$$T_1 = T_0 + \frac{1}{\eta_i^S} (T_{1s} - T_0), \quad (7)$$

$$T_3 = T_2 - \eta_i^{TG} (T_2 - T_{3s}), \quad (8)$$

$$z_{TE_w}^{opt} = \frac{T_{1s}}{T_0} = \frac{T_2}{T_{3s}} = \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (9)$$

Ze wzoru (6) wyznacza się optymalny stosunek ciśnień $z_{TE_w}^{opt}$, dla którego obieg przyjmuje maksymalną sprawność $\eta_{TE_w}^{max}$, a więc maksymalną moc. Identycznie postępuje się przy obliczeniu maksymalnej sprawności obiegu $\eta_{TE_n}^{max}$ turboekspandera niskociśnieniowego (rys. 5).

Stosunek $z_{TE_w}^{opt}$ jest funkcją temperatur T_0 , T_2 oraz sprawności mechanicznych η_m sprężarki i turboekspandera (przyjęto, że sprawności mechaniczne

sprężarki i turboekspandera są takie same) oraz sprawności wewnętrznych sprężarki η_i^S i $\eta_i^{TE_w}$ turboekspandera:

$$z_{TE_w}^{opt} (T_0, T_2, \eta_m, \eta_i^S, \eta_i^{TE_w}) = \left(\frac{p_1}{p_0} \right)_{opt}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \quad (10)$$

gdzie:

κ - wykładnik izentropy helu ($\kappa = 1,66$), $p_1 = p_2, p_0$ - ciśnienia czynnika obiegowego podczas pochłaniania i oddawania ciepła (w obliczeniach przyjęto $p_0 = 0,1$ MPa).

W obliczeniach termodynamicznych przyjęto temperaturę helu doprowadzanego do sprężarek oraz że sprawności mechaniczne sprężarki i turboekspandera są sobie równe i wynoszą $\eta_m^S = \eta_m^{TE} = \eta_m = 0,97$, a ich sprawności wewnętrzne równają się $\eta_i^{TE_w} = 0,87$, $\eta_i^S = 0,85$.

Optymalna wartość $z_{TE_w}^{opt}$ wynika z warunku:

$$\frac{d\eta_{TE_w}}{dz_{TE_w}} = 0. \quad (11)$$

Po zróżniczkowaniu równania (6) i wykorzystaniu warunku (11) otrzymuje się:

$$(bc - ad)(z_{TE_w}^{opt})^2 - 2bcz_{TE_w}^{opt} + b(c + d) = 0, \quad (12)$$

skąd:

$$z_{TE_w}^{opt} = \frac{bc - \sqrt{bd(ad + ac - bc)}}{(bc - ad)}, \quad (13)$$

gdzie:

$$a = T_0, \quad b = \eta_m^2 \eta_i^S \eta_i^{TE_w} T_2, \quad (14)$$

$$c = \eta_m T_0, \quad d = \eta_m \eta_i^S (T_2 - T_0).$$

Drugi pierwiastek równania (12) jest nierealny, gdyż temperatura T_1 byłaby większa od temperatury T_2 .

Maksymalną wartość $z_{TE_w}^{opt}$ oblicza się z równania (6) podstawiając w nim za z_{TE_w} wielkość $z_{TE_w}^{opt}$. W konsekwencji dla $z_{TE_w}^{opt}$ i danej wartości \dot{Q}_d oblicza się maksymalną moc turboekspandera wysokociśnieniowego wykorzystywaną w analizie ekonomicznej.

Temperatury czynnika obiegowego za sprężarką T_1 oraz za turbiną T_3 wyznaczane są, jak już zaznaczono, za pomocą nieodwracalnych adiabat:

$$T_1 = T_0 \left[1 + \frac{1}{\eta_i^S} (z_{TE_w}^{opt} - 1) \right], \quad (15)$$

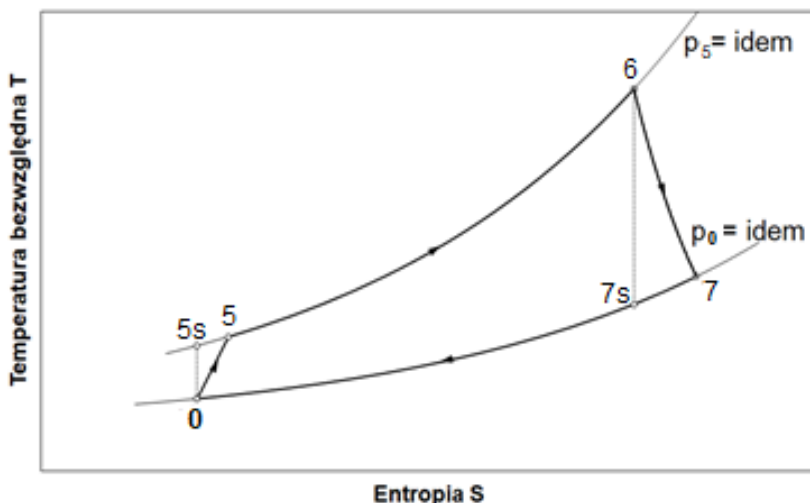
$$T_3 = T_2 \left[1 - \eta_i^{TE_w} \left(1 - \frac{1}{z_{TE_w}^{opt}} \right) \right]. \quad (16)$$

Identycznie wyznacza się wartości $z_{TE_n}^{opt}$ i $\eta_{TE_n}^{max}$ dla turboekspandera niskociśnieniowego (rys. 3, 5) z tym, że za temperatury T_1 , T_2 i T_3 (rys. 3, 5) we wzorach (6), (10), (14), (15) i (16) należy wówczas odpowiednio podstawić temperatury T_5 , T_6 i T_7 , a za ciśnienie p_1 we wzorze (10) ciśnienie p_5 . I tak na przykład temperatura T_7 wyraża się wzorem:

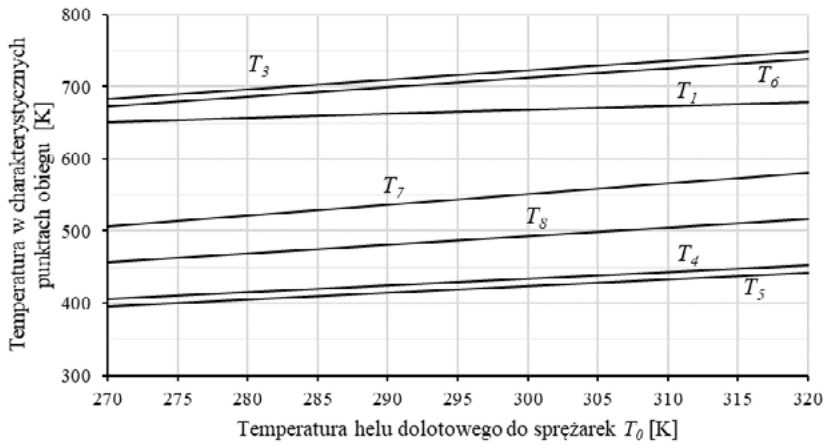
$$T_7 = T_6 \left[1 - \eta_i^{TE_n} \left(1 - \frac{1}{z_{TE_n}^{opt}} \right) \right] \quad (17)$$

Wykorzystując obliczone sprawności $\eta_{TE_w}^{max}$, $\eta_{TE_n}^{max}$ wyznacza się sprawność energetyczną hierarchicznej gazowo-gazowej elektrowni jądrowej:

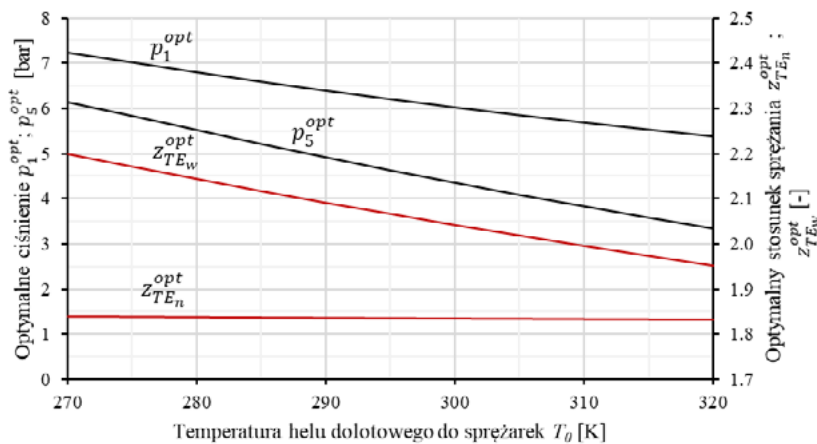
$$\eta_{G-G} = \eta_{TE_w}^{max} + \eta_{TE_n}^{max} - \eta_{TE_w}^{max} \eta_{TE_n}^{max} \quad (18)$$



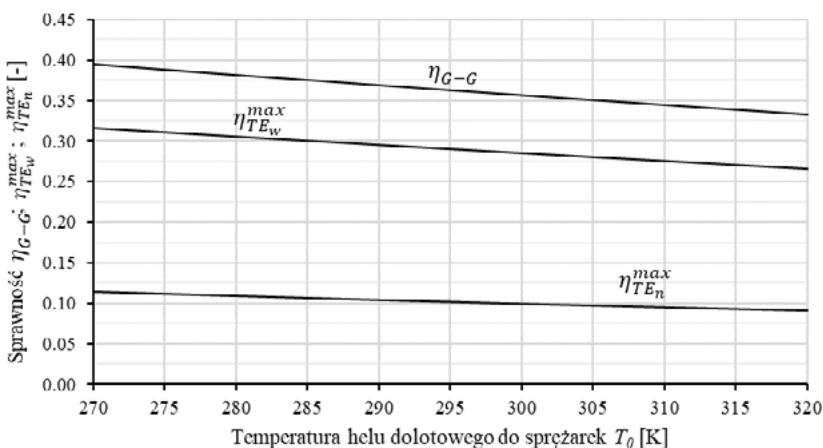
Rys. 5. Obieg Joule'a turboekspandera niskociśnieniowego



Rys. 6. Wartości temperatur $T_1, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$ w funkcji temperatury T_0 helu dolotowego do sprężarek wysoko- i niskoprężnej



Rys. 7. Wartości optymalnych ciśnień p_1^{opt}, p_5^{opt} oraz optymalnych stosunków sprężania $z_{TTEw}^{opt}, z_{TTEn}^{opt}$ funkcji temperatury T_0 helu dolotowego do sprężarek wysoko- i niskoprężnej



Rys. 8. Wartości sprawności $\eta_{G-G}, \eta_{TTEw}^{max}, \eta_{TTEn}^{max}$ w funkcji temperatury T_0 helu dolotowego do sprężarek wysoko- i niskoprężnej

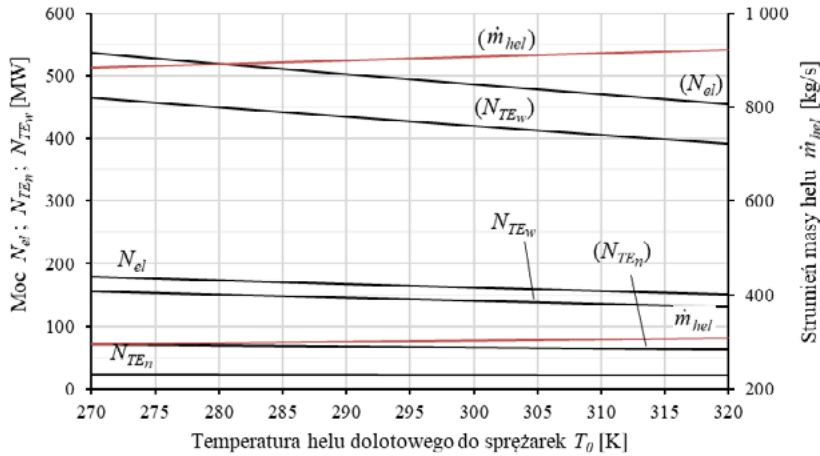
Wyniki termodynamicznych obliczeń przedstawiono na rys. 6-10. Wszystkie obliczenia przeprowadzono oczywiście dla temperatury $T_2 = 1300$ K.

Jak wynika z zaprezentowanych na rys. 6-10 obliczeń, im temperatura jest niższa, tym większe są sprawności $\eta_{G-G}, \eta_{TTEw}^{max}, \eta_{TTEn}^{max}$ i moce N_{el}, N_{TEw}, N_{TEn} . Obniżanie bowiem temperatury T_0 pozwala zmniejszyć moce napędowe sprężarek S_w i S_n (patrz wzór (1)), a tym samym zwiększyć sprawności $\eta_{G-G}, \eta_{TTEw}^{max}, \eta_{TEn}^{max}$ i moce N_{el}, N_{TEw}, N_{TEn} . Zmniejszanie zatem temperatury czynnika chłodzącego hel w wymienniku W do wartości niższej od temperatury otoczenia pozwoliłoby jeszcze bardziej zmniejszyć wkład pracy w sprężarkach S_w i S_n , ale wymagałoby to jednak dodatkowego wkładu pracy dla uzyskania oziębionego czynnika chłodzącego. Per saldo ten dodatkowy wkład pracy byłby większy od zmniejszonego wkładu pracy w sprężarkach. Nie opłaca się zatem, co oczywiste, oziębianie czynnika chłodzącego poniżej temperatury otoczenia. Jest to zgodne z jedną z ogólnych zasad zmniejszania niedoskonałości procesów cieplnych, która mówi, że wydłużanie łańcucha przemian termodynamicznych jest tylko źródłem dodatkowych strat energii w układzie termodynamicznym, a więc zwiększa w nim wkład pracy [8].

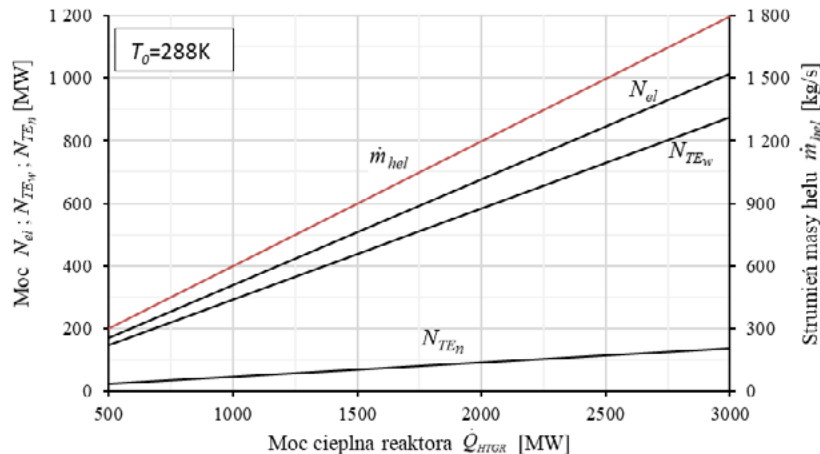
Analiza ekonomiczna hierarchicznej gazowo-gazowej elektrowni jądrowej z wysokotemperaturowym reaktorem i helum jako czynnikiem obiegowym

Najistotniejszą wielkością ekonomiczną decydującą o opłacalności ekonomicznej budowy i eksploatacji elektrowni pracujących według dowolnych technologii energetycznych jest jednostkowy koszt produkcji w nich energii elektrycznej. Oblicza się go ze wzoru:

$$k_{el} = \frac{K_R}{E_{el,R}} = \frac{K_e + K_{kap}}{E_{el,R}} \quad (19)$$



Rys. 9. Wartości mocy N_{el} , N_{TEw} , N_{TE_n} i strumienia masy helu $\dot{m}_{hel} = \dot{m}_{TEw} + \dot{m}_{TE_n}$ ($\dot{m}_{TE_n} = \dot{m}_{TEw}$) w funkcji temperatury T_0 helu dołotowego do sprężarek wysoko- i niskopięznej z mocą cieplną reaktora $\dot{Q}_{HTGR} = 500$ oraz 1500 MW jako parametrem (wartości w nawiasach odpowiadają mocy cieplnej $\dot{Q}_{HTGR} = 1500$ MW)



Rys. 10. Wartości mocy N_{el} , N_{TEw} , N_{TE_n} i strumienia masy helu $\dot{m}_{hel} = \dot{m}_{TEw} + \dot{m}_{TE_n}$ ($\dot{m}_{TE_n} = \dot{m}_{TEw}$) w funkcji mocy cieplnej reaktora \dot{Q}_{HTGR}

a po zamortyzowaniu elektrowni z oczywistej wówczas zależności:

$$k_{el,amort} = \frac{K_e}{E_{el,R}} \quad (20)$$

gdzie:

$E_{el,R}$ - roczna produkcja netto elektryczności w elektrowni,
 K_e - roczny koszt eksploatacji elektrowni,
 K_{kap} - roczny koszt kapitałowy elektrowni,
 K_R - całkowity roczny koszt działania elektrowni (suma kosztów eksploatacji K_e i kapitałowych K_{kap}).

Roczna produkcja netto elektryczności w elektrowni wyraża się wzorem:

$$E_{el,R} = N_{el}(1 - \varepsilon_{el})\tau_R \quad (21)$$

gdzie:

ε_{el} - wskaźnik elektrycznych potrzeb własnych elektrowni,
 τ_R - roczny czas pracy elektrowni; czas pracy dla nowych bloków jądrowych zakładany jest τ_R na poziomie = 8000 h/a.

Na roczny koszt eksploatacji K_e elektrowni składają się: koszt paliwa K_{pal} , koszt płać z narzutami K_p , koszt kon-

serwacji i remontów K_{rem} , koszt surowców nieenergetycznych i materiałów pomocniczych K_m , koszt podatków, opłat i ubezpieczeń K_u :

$$K_e = K_{pal} + K_p + K_{rem} + K_m + K_u \quad (22)$$

Jak już zaznaczono wyżej, koszt paliwa jądrowego K_{pal} stanowi ok. 5% rocznych kosztów K_R działania elektrowni jądrowych (w tych 5% zawarty jest również koszt utylizacji paliwa). W analizach ekonomicznych eksploatacji rozważanej w pracy elektrowni jądrowej gazowo-gazowej przyjęto ponadto, że koszt płać z narzutami K_p plus koszt podatków, opłat i ubezpieczeń K_u stanowią 25% kosztu konserwacji i remontów K_{rem} , koszt surowców nieenergetycznych i materiałów pomocniczych K_m stanowi 2% kosztu paliwa. Należy również, co szalenie istotne, kolejny raz bardzo mocno zaznaczyć, że eksploatacja elektrowni jądrowej w hierarchicznej technologii gazowo-gazowej nie wymaga wody. Elektrownie te mogą być zatem budowane tam, gdzie jej nie ma.

Roczny koszt konserwacji i remontów urządzeń wynosi:

$$K_{rem} = \delta_{rem} J, \quad (23)$$

gdzie:

δ_{rem} - roczna stopa kosztów konserwacji i remontów (w obliczeniach przyjęto $\delta_{rem} = 3\%$).

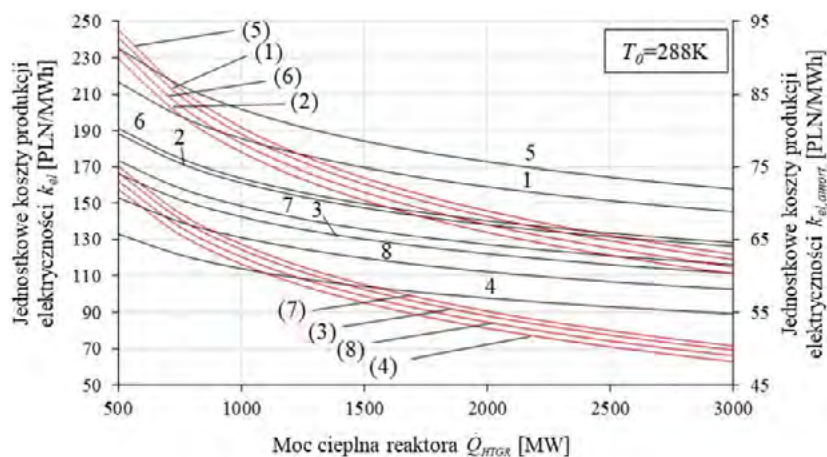
Nakłady inwestycyjne wyrażają się wzorem:

$$J = N_{el} i, \quad (24)$$

przy czym jednostkowe (na jednostkę mocy) nakłady inwestycyjne przyjęto zgodnie z równaniem:

$$i = x_i \times 50 (N_{el})^{-0,223} \text{ [mln PLN/MW]} \quad (25)$$

w którym moc N_{el} wyrażona jest w MW, a x_i oznacza mnożnik jednostkowych nakładów inwestycyjnych zmieniający ich wartość (do wielowariantowych obliczeń przyjęto dwie wartości x_i , raz że $x_i = 1$ i dwa, że $x_i = 0,8$; rys. 11).



Rys. 11. Wartości jednostkowych kosztów produkcji elektryczności k_{el} , $k_{el,amort}$ w funkcji mocy cieplnej reaktora \dot{Q}_{HTGR} ze stopą oprocentowania kapitału inwestycyjnego r , jednostkowymi nakładami inwestycyjnymi i oraz latami eksploatacji elektrowni T jako parametrami, gdzie: 1 - $r = 5\%$, $T = 80$ lat, $x_i = 1.0$; 2 - $r = 3\%$, $T = 80$ lat, $x_i = 1.0$; 3 - $r = 5\%$, $T = 80$ lat, $x_i = 0.8$; 4 - $r = 3\%$, $T = 80$ lat, $x_i = 0.8$; 5 - $r = 5\%$, $T = 40$ lat, $x_i = 1.0$; 6 - $r = 3\%$, $T = 40$ lat, $x_i = 1.0$; 7 - $r = 5\%$, $T = 40$ lat, $x_i = 0.8$; 8 - $r = 3\%$, $T = 40$ lat, $x_i = 0.8$; (oznaczenia w nawiasach dotyczą $k_{el,amort}$)

Roczny koszt kapitałowy K_{kap} jest sumą kosztów amortyzacji i finansowych, tj. kosztów mających zwrócić poniesione nakłady inwestycyjne J wraz z odsetkami od nich:

$$K_{kap} = z\rho J, \quad (26)$$

przy czym:

z - współczynnik zamrożenia kapitału inwestycyjnego J w trakcie budowy elektrowni, $z > 1$ [4]:

$$z = \frac{(1+r)^{b+1} - 1}{(b+1)r} \quad (27)$$

ρ - stopa amortyzacji oprocentowanej [4]:

$$\rho = \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (28)$$

gdzie:

b - okres trwania budowy elektrowni (w obliczeniach przyjęto $b = 5$ lat),
 r - stopa oprocentowania kapitału inwestycyjnego,
 T - lata eksploatacji elektrowni.

Wyniki obliczeń jednostkowych kosztów produkcji elektryczności k_{el} , $k_{el,amort}$ przedstawiono na rys. 11.

Jak wynika z rys. 1 i 11 jednostkowe koszty produkcji energii elektrycznej w układzie gazowo-gazowym z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym i helem jako czynnikiem obiegowym (rys. 3) są bardzo istotnie niższe od kosztów w elektrowni jądrowej, w której realizowany jest obieg *Clausiusa-Rankine'a* z wodą jako czynnikiem obiegowym.

Wnioski

Budowa elektrowni jądrowych jest absolutną koniecznością, gdyż zapewniają one, co istotne, stabilne zasilanie odbiorców w „czystą” i jednocześnie tania energię elektryczną przez cały rok. Bardzo duże znaczenia ma też możliwość ich elastycznej pracy, tj. możliwość szybkiego zmniejszania obciążenia nawet do 20% ich znamionowej mocy elektrycznej, by w sytuacjach gdy zaczyna wiać wiatr i świecić słońce „dawać” dostęp do sieci elektroenergetycznej odnawialnym źródłom energii pomimo tego, że OZE produkują wielokrotnie droższą energię elektryczną. Co więcej, należy budować elektrownie jądrowe w hierarchicznej technologii gazowo-gazowej z wysokotemperaturowym reaktorem

jądrowym i z helem jako czynnikiem obiegowym (rys. 3), zamiast elektrowni z obiegiem *Clausiusa-Rankine'a*. Fundamentalną bowiem przewagą elektrowni gazowo-gazowych nad elektrowniami „*Clausiusa-Rankine'a*” są niskie na nie jednostkowe nakłady inwestycyjne (na jednostkę zainstalowanej mocy elektrycznej). Jak już wyżej zaznaczono, są one co najmniej o kilkadziesiąt procent mniejsze od nakładów na elektrownie jądrowe w technologii „*Clausiusa-Rankine'a*”. Mało tego, sprawności energetyczne elektrowni gazowo-gazowych są wysokie. Są porównywalne ze sprawnością bloków „*Clausiusa-Rankine'a*” z nadkrytycznymi parametrami pary świeżej [9]. Co więcej, i co należy kolejny raz *expressis verbis* powiedzieć, do ich eksploatacji niepotrzebna jest woda, a więc w przeciwieństwie do elektrowni jądrowych „*Clausiusa-Rankine'a*” mogą być budowane nawet na terenach, na których jej nie ma. W konsekwencji niskie nakłady inwestycyjne oraz brak gospodarki wodnej w elektrowni gazowo-gazowej powoduje, że jednostkowy koszt produkcji w niej energii elektrycznej jest bardzo niski. Nie przekracza 200 PLN/MWh i jest o kilkadziesiąt procent niższy od kosztu w elektrowni jądrowej z obiegiem *Clausiusa-Rankine'a*. Mało tego, jest najniższy spośród kosztów uzyskiwanych we wszystkich innych dostępnych technologiach energetycznych [5]. Z uwagi na powyższe można sformułować tezę, że elektrownie w hierarchicznej technologii gazowo-gazowej z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym i helem jako czynnikiem obiegowym powinny „zrewolucjonizować” energetykę. Również i budowa elektrociepłowni w tej technologii (rys. 3) pozwoli w jeszcze większym stopniu to zrobić. Zgodnie bowiem z kolejną ogólną zasadą zmniejszania niedoskonałości termodynamicznej procesów cieplnych mówiącą, że należy realizować procesy skojarzone wytwarzające więcej niż jeden produkt użyteczny [8], nastąpi istotne zwiększenie efektywności ekonomicznej energetyki. Koszty produkcji ciepła grzejnego będą



fot. unsplash

wówczas bardzo niskie. Jednocześnie bowiem wytwarzanie dwóch lub więcej produktów użytecznych skraca łańcuch przemian termodynamicznych i tym samym zapewnia znaczne zmniejszenie strat egzergii. Znaczne efekty energetyczne skojarzonej gospodarki ciepło-elektrycznej są właśnie następstwem skrócenia łańcucha przemian w porównaniu z gospodarką rozdzieloną, co przekłada się właśnie na dużą efektywność

ekonomiczną procesów skojarzonych. Wartość rocznego wskaźnika skojarzonej pracy elektrociepłowni gazowo-gazowej (stosunek rocznej produkcji energii elektrycznej $E_{el,R}$ do rocznej produkcji ciepła Q_R) jest przy tym bardzo duża, co jest ogromną zaletą, i wynosi aż $\sigma_R = E_{el,R}/Q_R = 3$ [1, 2, 9]. Co więcej, niskie nakłady inwestycyjne na elektrociepłownie gazowo-gazowe z reaktorem jądrowym HTGR i helem jako czynnikiem

obiegowym dodatkowo jeszcze spowodują ich wysoką, co bardzo ważne, opłacalność ekonomiczną. Ważne dlatego, bo to przecież ostatecznie efektywność ekonomiczna decyduje o stosowaniu konkretnych rozwiązań technologicznych i technicznych. To ich wysoka opłacalność ekonomiczna jest podstawą podejmowania decyzji inwestycyjnych o ich budowie. □

Literatura

1. Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A.: *Thermodynamic and economic analysis of a gas turbine set coupled with a turboexpander in a hierarchical gas-gas system*. *Energy* 2020, 190, 116394, doi:10.1016/j.energy.2019.116394.
2. Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A., Otawa A., Skomudek W.: *Thermodynamic and Economic Analysis of Trigeneration System Comprising a Hierarchical Gas-Gas Engine for Production of Electricity, Heat and Cold*. *Energies* 2020, 13, 1006; doi:10.3390/en13041006.
3. Bartnik R.: *Elektrownie i elektrociepłownie gazowo-parowe. Efektywność energetyczna i ekonomiczna*, WNT, Warszawa 2009 (reprint 2012 WNT, 2017 PWN).
4. Bartnik R., Bartnik B.: *Rachunek ekonomiczny w energetyce*, WNT, Warszawa 2014.
5. Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A.: *Ekonomia energetyki w modelach matematycznych z czasem ciągłym*, PWN SA, Warszawa, 2017.
6. Bartnik R.: *The Modernization Potential of Gas Turbines in the Coal-Fired Power Industry. Thermal and Economic Effectiveness*, Wydawnictwo Springer, London 2013.
7. Bartnik R.: *Układ do wytwarzania energii elektrycznej i ciepła*. Patent PL 216 596 B1.
8. Szargut J.: *Termodynamika Techniczna*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
9. Bartnik R., Kowalczyk T.: *Hierarchical gas-gas systems. Thermal and Economic Effectiveness*. Wydawnictwo Springer, London 2021.