

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

Analiza termodynamiczna i ekonomiczna hierarchicznej dwuobiegowej elektrowni jądrowej

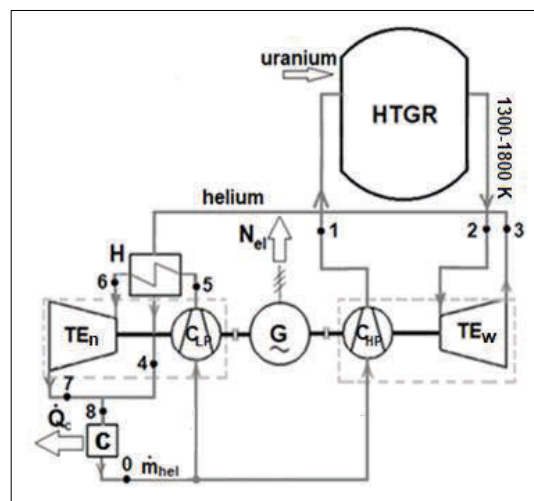
z dwustopniowym rozprężaniem i dwustopniowym sprężaniem w obiegu Joule'a w zakresie wysokich temperatur

W pracach [1, 2, 3] przedstawiono termodynamiczną i ekonomiczną analizę innowacyjnej, hierarchicznej elektrowni jądrowej z jednym, chłodzonym helem wysokotemperaturowym reaktorem HTGR (rys. 1). W elektrowni realizowane są dwa obiegi Joule'a, jeden wysokotemperaturowy, drugi niskotemperaturowy. Oba obiegi charakteryzują się pojedynczymi stopniami rozprężania i sprężania helu. W niniejszej pracy przedstawiono natomiast analizę termodynamiczną i ekonomiczną elektrowni z dwoma wysokotemperaturowymi reaktorami HTGR (rys. 2).

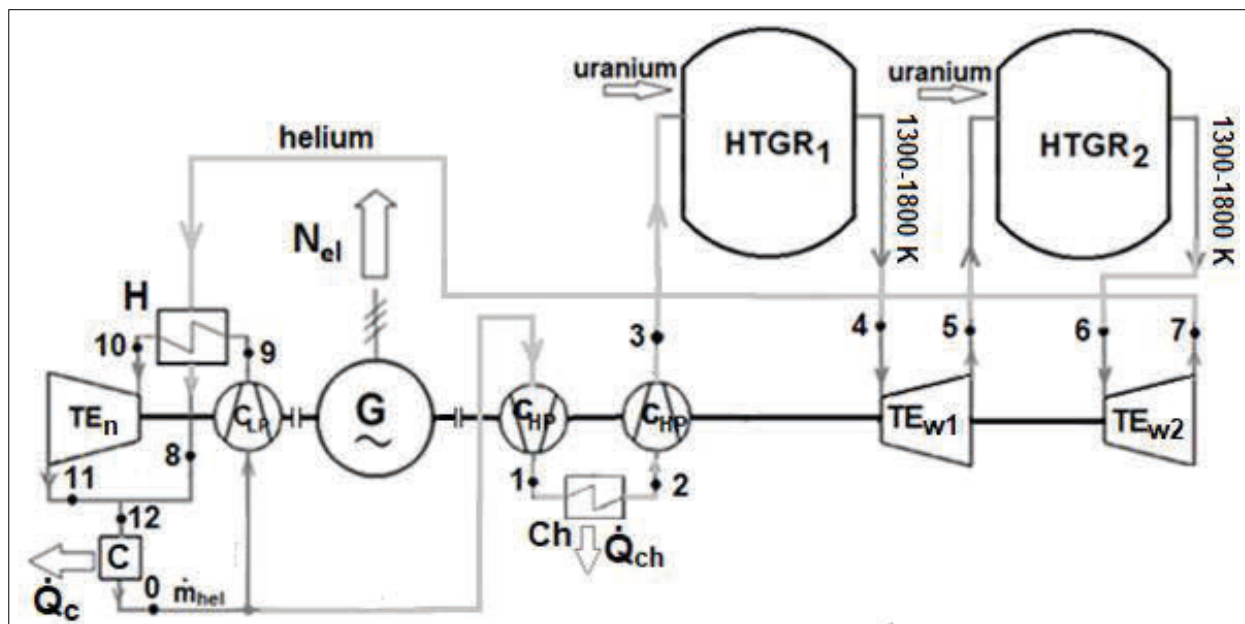
Wysokotemperaturowy obieg Joule'a charakteryzuje się zatem dwustopniowym rozprężaniem (rys. 3). Również i proces sprężania helu w tym obiegu jest dwustopniowy. Drugi obieg, niskotemperaturowy (rys. 4) charakteryzuje się natomiast, tak jak w elektrowni z rys. 1 [1, 2, 3], jednostopniowym rozprężaniem i jednostopniowym sprężaniem.

Analiza termodynamiczna doboru optymalnych parametrów termicznych czynnika obiegowego w poszczególnych punktach obiegu Joule'a z dwustopniowym rozprężaniem i dwustopniowym sprężaniem

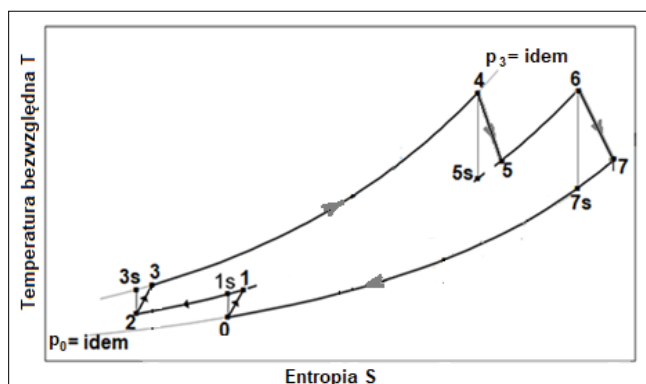
W pracy [3] wykazano, że aby obieg Joule'a z dwustopniowym rozprężaniem i dwustopniowym sprężaniem mógł osiągać maksymalną sprawność energetyczną, to muszą zachodzić związki:



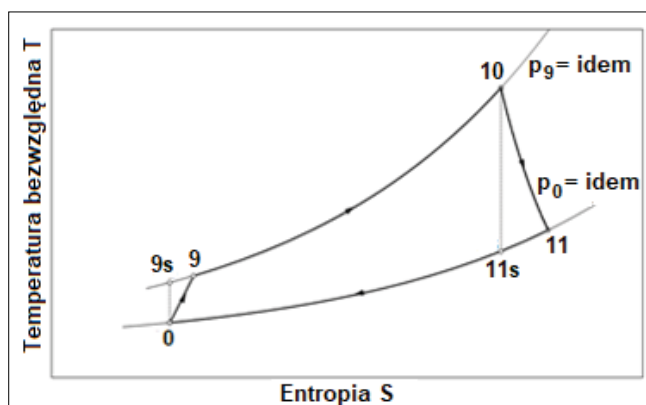
Rys. 1. Hierarchiczna elektrownia jądrowa



Rys. 2. Schemat ideowy hierarchicznej gazowo-gazowej elektrociepłowni i elektrowni jądrowej z dwoma wysokotemperaturowymi reaktorami i helium jako czynnikiem obiegowym (w obiegu wysokotemperaturowym ma miejsce dwustopniowe rozprężanie i dwustopniowe sprężanie; w obiegu niskotemperaturowym ma miejsce jednostopniowe rozprężanie i jednostopniowe sprężanie (C - wymiennik ciepłowniczy; C_{HP} - dwustopniowa sprężarka wysokociśnieniowa z chłodnicą międzystopniową Ch; C_{LP} - sprężarka niskociśnieniowa; G - generator elektryczny; HTGR - wysokotemperaturowy reaktor jądrowy chłodzony heliem; H - wymiennik ciepła; T_{EW} , T_{En} - turboekspandery wysoko- i niskociśnieniowy; (w przypadku elektrowni strumień ciepła \dot{Q}_c jest wyprowadzany nie do sieci ciepłowniczej, a do otoczenia)



Rys. 3. Obieg *Joule'a* turboekspandera wysokociśnieniowego z dwustopniowym rozprężaniem i dwustopniowym sprężaniem



Rys. 4. Obieg *Joule'a* turboekspandera niskociśnieniowego z jednostopniowym rozprężaniem i jednostopniowym sprężaniem



$$z_2 = \frac{T_0}{T_2} z_1 \quad (1)$$

$$z_3 = \sqrt{\frac{T_0}{T_2}} z_1 \quad (2)$$

przy czym:

$$z_1 = \frac{T_{1s}}{T_0} = \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (3)$$

$$z_2 = \frac{T_{3s}}{T_2} = \left(\frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (4)$$

$$z_3 = \frac{T_4}{T_{5s}} = \left(\frac{p_4}{p_5} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_6}{T_{7s}} = \left(\frac{p_6}{p_7} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (5)$$

gdzie:

κ - wykładnik izentropy helu ($\kappa = 1,66$),

p - ciśnienia ($p_2 = p_1$, $p_4 = p_3$, $p_6 = p_5$, oraz $p_7 = p_0$; ciśnienie p_0 jest daną wartością wejściową; w obliczeniach przyjęto $p_0 = 1 \text{ bar}$),

T - temperatury bezwzględne (temperatury T_0 , T_2 , T_4 , T_6 są danymi wartościami wejściowymi ($T_4 = T_6$, im wyższe są temperatury T_4 , T_6 , tym większa jest sprawność obiegu *Joule'a*).

Optymalne (gwarantujące maksymalną sprawność efektywną) termiczne parametry czynnika obiegowego w poszczególnych punktach obiegu *Joule'a* turboekspandera wysokociśnieniowego wyznacza się z wykorzystaniem wzoru:

$$\eta_{TE_w} = \frac{N_{TE_w}}{\dot{Q}_{dop,TE_w}} = \frac{N_{exp_w} - N_{S_w}}{\dot{Q}_{dop,TE_w}} = \frac{\eta_m^{TE} (T_4 - T_5 + T_6 - T_7) - \frac{1}{\eta_m^S} (T_1 - T_0 + T_3 - T_2)}{T_4 - T_3 + T_6 - T_5} \rightarrow \max \quad (6)$$

gdzie N_{TE_w} oznacza moc efektywną turbozespołu wysokociśnieniowego, N_{exp_w} , N_{S_w} moce efektywne turboekspandera wysokociśnieniowego i sprężarki wysokociśnieniowej, a \dot{Q}_{dop,TE_w} strumień ciepła doprowadzonego do obiegu:

$$N_{TE_w} = \dot{m}_{TE_w;hel} c_{p,hel} \left[\eta_m (T_4 - T_5 + T_6 - T_7) - \frac{1}{\eta_m} (T_1 - T_0 + T_3 - T_2) \right] = \dot{Q}_{HTGR_1} \left[\frac{\eta_m (T_4 - T_5 + T_6 - T_7) - \frac{1}{\eta_m} (T_1 - T_0 + T_3 - T_2)}{T_4 - T_3} \right] \quad (7)$$

przy czym:

$$\dot{Q}_{dop,TE_w} = \dot{Q}_{HTGR_1} + \dot{Q}_{HTGR_2} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{HTGR_1} = \dot{m}_{TE_w;hel} c_{p,hel} (T_4 - T_3) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{HTGR_2} = \dot{m}_{TE_w;hel} c_{p,hel} (T_6 - T_5) \quad (10)$$

We wzorze (7) przyjęto, że sprawności mechaniczne sprężarki η_m^S i turboekspandera η_m^{TE} (wzór (6)) są sobie równe: $\eta_m^S = \eta_m^{TE} = \eta_m$ (w obliczeniach przyjęto, że $\eta_m^S = \eta_m^{TE} = \eta_m = 0,97$).



Wykorzystując wzór (6) z warunku:

$$\frac{d\eta_{TE_w}}{dz_1} = 0 \quad (11)$$

wyznacza się optymalny stosunek ciśnień $z_{1,opt}$, dla którego turbozespół przyjmuje maksymalną sprawność $\eta_{TE_w}^{max}$ (identycznie postępuje się przy obliczeniu maksymalnej sprawności efektywnej $\eta_{TE_n}^{max}$ turboekspandera niskociśnieniowego - rys. 4, wzór (19)).

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

$$a_{ir}(z_{1,opt})^2 + b_{ir}z_{1,opt} + c_{ir} = 0, \quad (12)$$

skąd

$$z_{1,opt} = \frac{-b_{ir} - \sqrt{\Delta_{ir}}}{2a_{ir}}, \quad (13)$$

przy czym:

$$\begin{aligned} a_{ir} &= b_{TE_w} d_{TE_w} - a_{TE_w} e_{TE_w}; \quad b_{ir} = 2(a_{TE_w} f_{TE_w} - c_{TE_w} d_{TE_w}); \quad c_{ir} = c_{TE_w} e_{TE_w} - b_{TE_w} f_{TE_w}; \\ \Delta_{ir} &= b_{ir}^2 - 4a_{ir}c_{ir}; \quad a_{TE_w} = 2 \frac{T_0}{\eta_i^S \eta_m}; \quad b_{TE_w} = 2\eta_m \eta_i^{TE} T_4 + \frac{T_0 + T_2}{\eta_i^S \eta_m}; \quad c_{TE_w} = 2\eta_m \eta_i^{TE} T_4 \sqrt{\frac{T_2}{T_0}} \\ d_{TE_w} &= \frac{T_0}{\eta_i^S}; \quad e_{TE_w} = T_4 - T_2 + \frac{T_2}{\eta_i^S} + \eta_i^{TE} T_4; \quad f_{TE_w} = \eta_i^{TE} T_4 \sqrt{\frac{T_2}{T_0}} \end{aligned}$$

gdzie:

η_i^S, η_i^{TE} - sprawności wewnętrzne sprężarek i turboekspanderów (w obliczeniach przyjęto $\eta_i^{TE} = 0,87, \eta_i^S = 0,85$; temperaturę otoczenia przyjęto równą $T_0 = 300$ K, temperaturę T_2 za chłodnicą międzystopniową równą $T_2 = T_0 + 20$ K).

Drugi pierwiastek równania (12) jest sprzeczny fizycznie.

Maksymalną wartość $\eta_{TE_w}^{max}$ oblicza się z równania (6) po podstawieniu w nim za temperatury ich optymalne wartości. Wartości te oblicza się dla optymalnych wartości $z_{1,opt}, z_{2,opt}, z_{3,opt}$ (optymalne wartości $z_{2,opt}, z_{3,opt}$ oblicza się ze wzorów (2), (4) podstawiając w nich za z_1 wartość $z_{1,opt}$):

$$T_1 = T_0 \left[1 + \frac{1}{\eta_i^S} (z_{1,opt} - 1) \right] \quad (14)$$

$$T_3 = T_2 \left[1 + \frac{1}{\eta_i^S} (z_{2,opt} - 1) \right] \quad (15)$$

$$T_5 = T_4 \left[1 - \eta_i^{TE} \left(1 - \frac{1}{z_{3,opt}} \right) \right] \quad (16)$$

$$T_7 = T_6 \left[1 - \eta_i^{TE} \left(1 - \frac{1}{z_{3,opt}} \right) \right] \quad (17)$$

Optymalne wartości ciśnień oblicza się ze wzorów (3), (4), (5) dla $z_{1,opt}$, przy czym ciśnienia $p_7 = p_0$ są dane ($p_7 = p_0 = 1$ bar).

Istotne jest także znalezienie wartości $z_{1,N}$ (rys. 6, 12), dla której turbozespół wysokotemperaturowy osiąga maksymalną moc $N_{TE_w}^{max}$. Wartość ta wynika z warunku:



$$\frac{dN_{TE_w}}{dz_1} = 0. \quad (18)$$

Porównując wzór (7) ze wzorem (6) staje się oczywiste, że wartość $z_{1,N}$ jest różna od wartości $z_{1,opt}$, $z_{1,N} \neq z_{1,opt}$, tj. wartości dla której turbozespół wysokotemperaturowy przyjmuje maksymalną sprawność $\eta_{TE_w}^{max}$ (rys. 5, 11). Mianowniki bowiem wzorów (6) i (7) są różne, co wynika z dwóch reaktorów HTGR₁ i HTGR₂, a więc dwóch strumieni ciepła \dot{Q}_{HTGR_1} , \dot{Q}_{HTGR_2} doprowadzanych do obiegu (wzory (9), (10), rys. 10, 18). W konsekwencji tyle samo jest stopni rozprężania. Strumień masy helu, który krąży w obiegu jest natomiast oczywiście tylko jeden (patrz wzory (9) i (10)). W przypadku natomiast obiegu Joule'a z jednostopniowym rozprężaniem zachodzi równość: $z_{1,N} = z_{1,opt}$. Mianowniki mają bowiem wówczas takie same postacie. Na przykład dla obiegu Joule'a turboekspandera niskotemperaturowego (rys. 4) wzory na sprawność i moc efektywną przedstawiają się równaniami:

$$\eta_{TE_n} = \frac{N_{TE_n}}{\dot{Q}_{dop,TE_n}} = \frac{N_{exp_n} - N_{S_n}}{\dot{Q}_{dop,TE_n}} = \frac{\eta_m(T_{10} - T_{11}) - \frac{1}{\eta_m}(T_9 - T_0)}{T_{10} - T_9} \quad (19)$$

$$N_{TE_n} = \dot{m}_{TE_n;hel} c_{p,hel} \left[\eta_m(T_{10} - T_{11}) - \frac{1}{\eta_m}(T_9 - T_0) \right] = \dot{Q}_{dop,TE_n} \left[\frac{\eta_m(T_{10} - T_{11}) - \frac{1}{\eta_m}(T_9 - T_0)}{T_{10} - T_9} \right] \quad (20)$$

Strumień masy helu w obiegu Joule'a turboekspandera wysokotemperaturowego $\dot{m}_{TE_w;hel}$ jest zdeterminowany mocą cieplną reaktora \dot{Q}_{HTGR} (wzór (9)). Natomiast strumień masy helu $\dot{m}_{TE_n;hel}$ w obiegu Joule'a turboekspandera niskotemperaturowego wynika z bilansu energii wymiennika ciepła H (rys. 2). Po pominięciu strat ciepła do otoczenia bilans ten wyraża się równaniem:

$$\dot{Q}_{dop,TE_n} = \dot{m}_{TE_n;hel} c_{p,hel} (T_{10} - T_9) = \dot{m}_{TE_w;hel} c_{p,hel} (T_7 - T_8). \quad (21)$$

Jak wykazano w [2] można przyjąć, że:

$$\dot{m}_{TE_n;hel} = \dot{m}_{TE_w;hel} \quad (22)$$

Całkowita wartość strumienia masy helu w układzie hierarchicznym (rys. 2) wyraża się zatem wzorem:

$$\dot{m}_{hel} = \dot{m}_{TE_w;hel} + \dot{m}_{TE_n;hel} = 2\dot{m}_{TE_w;hel} \quad (23)$$

Po zróżniczkowaniu równania (7) i wykorzystaniu warunku (18) otrzymuje się:

$$z_{1,N} = \frac{-b_{ir,N} - \sqrt{\Delta_{ir,N}}}{2a_{ir,N}}, \quad (24)$$

przy czym:

$$a_{ir,N} = b_{TE_w} d_{TE_w} - a_{TE_w} e_{TE_w,N}; \quad b_{ir,N} = -2c_{TE_w} d_{TE_w}; \quad c_{ir,N} = c_{TE_w} e_{TE_w,N};$$

$$\Delta_{ir,N} = b_{ir,N}^2 - 4a_{ir,N} c_{ir,N}; \quad e_{TE_w,N} = T_4 - T_2 + \frac{T_2}{\eta_i}.$$

Całkowita moc elektryczna układu hierarchicznego N_{el} wyraża się wzorem:

$$N_{el} = N_{TE_w,el} + N_{TE_n,el} \quad (25)$$



$$N_{TE_w,el} = N_{TE_w} \eta_G \quad (26)$$

$$N_{TE_n,el} = N_{TE_n} \eta_G \quad (27)$$

gdzie:

η_G - sprawność generatora elektrycznego (w obliczeniach przyjęto $\eta_G = 0,98$).

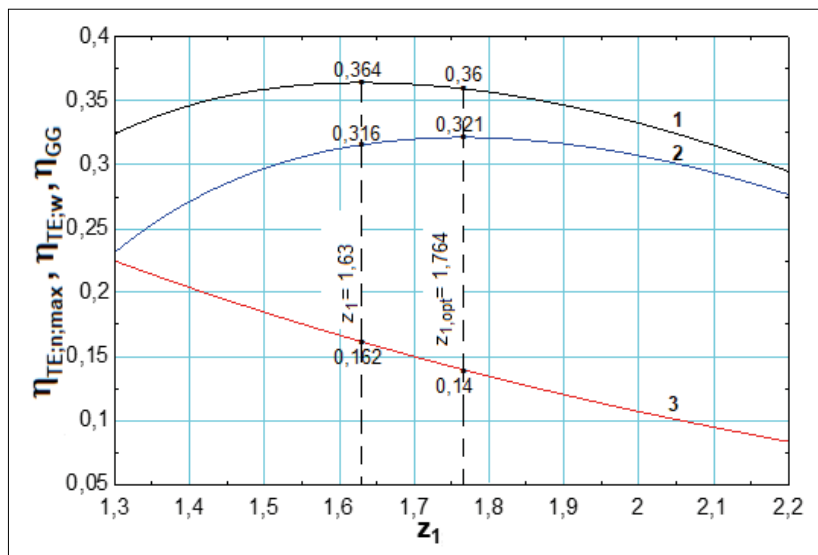
Wybrane wyniki termodynamicznych obliczeń

Obliczenia przeprowadzono dla mocy cieplnej reaktora $\dot{Q}_{HTGR_1} = 500$ MW oraz dla temperatur helu doprowadzanego do turboekspanderów wysokociśnieniowych $HTGR_1$ i $HTGR_2$ wynoszących $T_4 = T_6 = 1300$ i 1800 K (rys. 5-20). Przyjęto ponadto, że temperatura T_{10} wlotowa helu do turboekspandera niskociśnieniowego jest mniejsza od temperatury T_7 o wartość $\Delta T = 30$ K [1-3]. Ponadto przyjęto, że temperatura $T_2 = T_0 + 20$ K.

Na rys. 5 i 6 przedstawiono kolejno sprawności η_{G-G} , $\eta_{TE_n}^{\max}$, η_{TE_w} i moce elektryczne N_{el} , $N_{TE_w,el}$, $N_{TE_n,el}$. Sprawność energetyczną η_{G-G} hierarchicznego układu gazowo-gazowego oblicza się ze wzoru:

$$\eta_{G-G} = \frac{N_{TE_w} + N_{TE_n}}{\dot{Q}_{HTGR_1} + \dot{Q}_{HTGR_2}} \quad (28)$$

Na rys. 5 przedstawiono wartości sprawności energetycznych η_{G-G} , η_{TE_w} , $\eta_{TE_n}^{\max}$. Należy zaznaczyć, że jedynie wszystkie wartości η_{TE_n} (wzór (19)) na tym rysunku (również wartości p_9^{opt} na rys. 11) zostały obliczone za pomocą warunku $d\eta_{TE_n}/dz_{TE_n}$ i stąd na osi rzędnych występuje wielkość $\eta_{TE_n}^{\max}$.



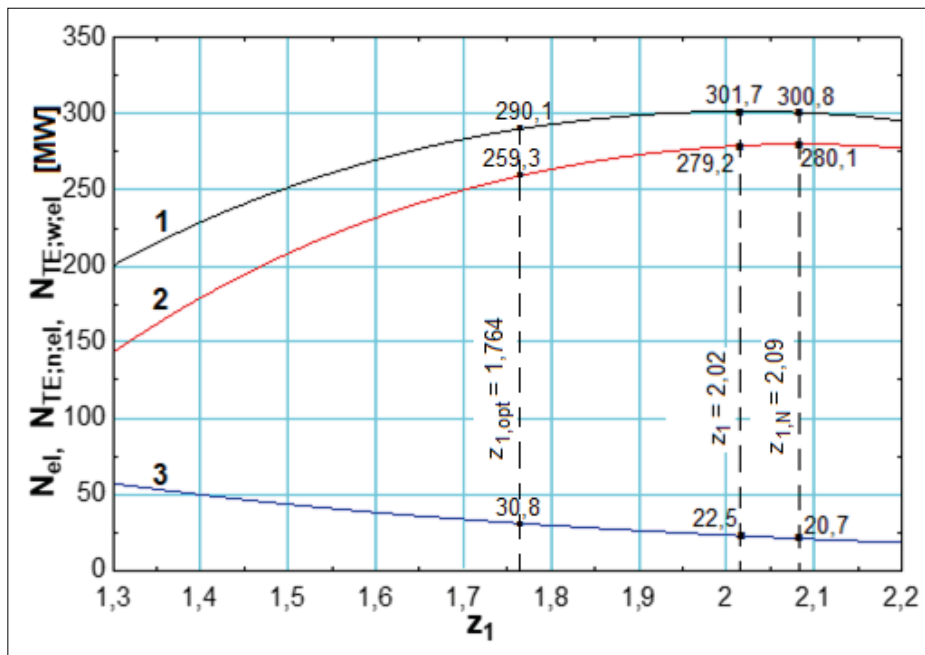
Rys. 5. Sprawności η_{G-G} , $\eta_{TE_n}^{\max}$, η_{TE_w} w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1300$ K ($1 - \eta_{G-G}$; $2 - \eta_{TE_w}$; $3 - \eta_{TE_n}^{\max}$)

Maksymalna wartość sprawności układu gazowo-gazowego $\eta_{G-G}^{\max} = 0,364$ osiągana jest dla wartości $z_1 = 1,63$ mniejszej od wartości optymalnej $z_1^{opt} = 1,764$, tj. wartości dla której turbozespół wysokotemperaturowy osiąga maksymalną sprawność $\eta_{TE_w}^{\max} = 0,321$ (rys. 5). Jest tak dlatego, gdyż dla $z_1 < z_1^{opt}$ temperatura T_7 znacząco rośnie ze zmniejszaniem się z_1 . Rośnie zatem i znacząco temperatura $T_{10} = T_7 - 30$ (rys. 12), a więc rośnie i sprawność $\eta_{TE_n}^{\max}$. Jej przyrost $\Delta \eta_{TE_n}^{\max} = 0,162 - 0,14 = 0,022$ jest więc znacząco większy od zmniejszenia sprawności $\Delta \eta_{TE_w} = 0,321 - 0,316 = 0,005$. W wyniku tego $\eta_{G-G}^{\max} = 0,364 > 0,36$.

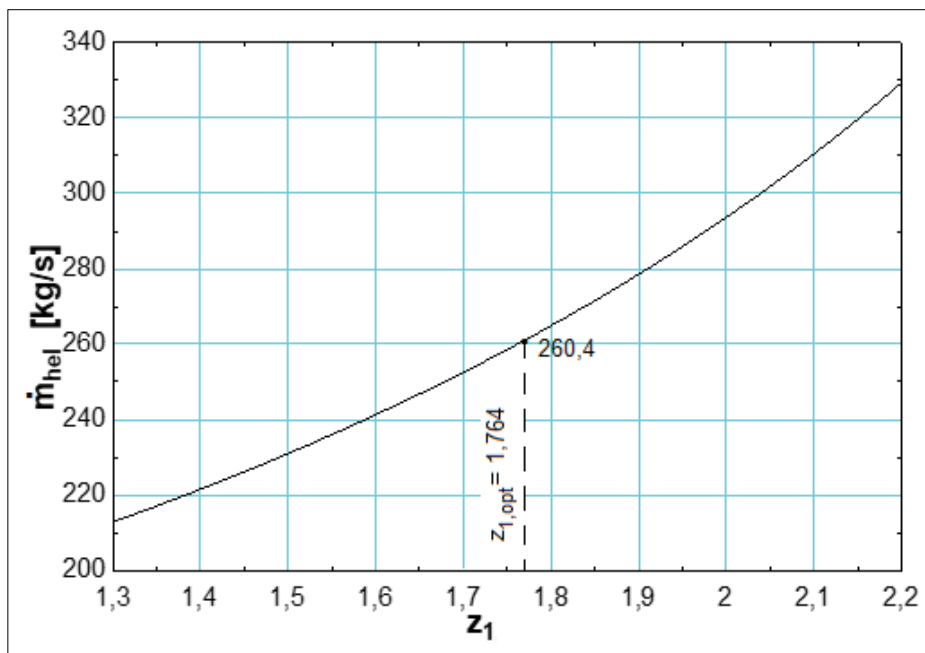
Ważnym pytaniem jest, czy w praktyce należy stosować wartość $z_1 = 2,02$, dla której moc N_{el} przyjmuje wartość maksymalną $N_{el}^{\max} = 301,7$ MW (rys. 6), a może wartość $z_1 = 1,63$, dla której to sprawność η_{G-G} przyjmuje wartość maksymalną $\eta_{G-G}^{\max} = 0,364$ (rys. 5). A może jeszcze inną? Odpowiedź jest jednoznaczna, należy w prak-



tyce stosować taką wartość z_1 , dla której efektywność ekonomiczna pracy układu gazowo-gazowego będzie osiągała swoje maksimum. Na to maksimum bardzo istotny wpływ ma strumień masy helu \dot{m}_{hel} (rys. 7), który, co ważne, jest tym mniejszy im mniejsza jest wartość parametru z_1 . Im mniejszy jest bowiem strumień \dot{m}_{hel} , tym mniejsze są nakłady inwestycyjne. Najmniejsze nakłady są, gdy jednostkowy strumień masy helu przypadający na jednostkę mocy elektrowni osiąga wartość minimalną: $D = \dot{m}_{hel} / N_{el} = D_{min} = 0,89$ (rys. 8). W praktyce można przyjąć taką wartość parametru z_1 , która znajduje się pomiędzy wartością $z_1 = 1,63$ zapewniającą największą sprawność $\eta_{G-G}^{max} = 0,364$, a wartością $z_1 = 1,67$ zapewniającą minimalny jednostkowy strumień helu $D_{min} = 0,89$. Spowoduje to wprowadzenie obniżenia sprawności w stosunku do sprawności maksymalnej, ale za to nastąpi zmniejszenie rozmiarów maszyn, a więc zmniejszenie nakładów inwestycyjnych.

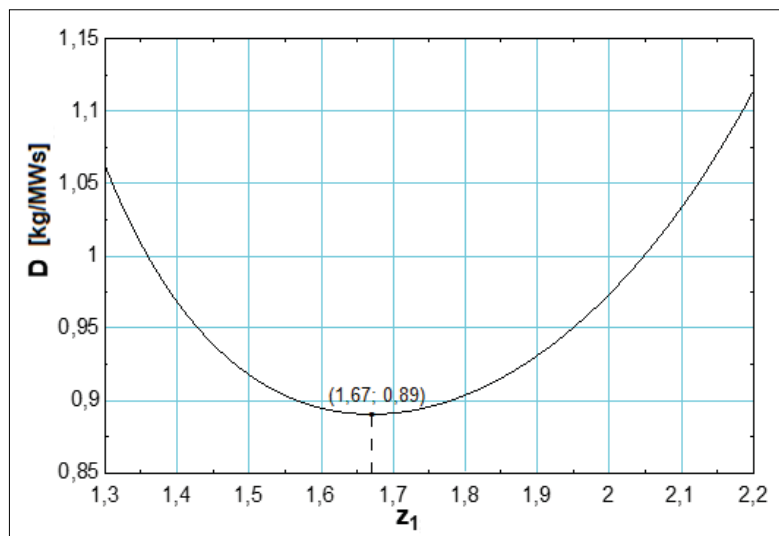


Rys. 6. Moce N_{el} , $N_{TE;n;el}$, $N_{TE;w;el}$, $N_{TE;el}$ w funkcji parametru z_1 , dla $T_4 = T_6 = 1300$ K
(1 - N_{el} ; 2 - $N_{TE;w;el}$; 3 - $N_{TE;n;el}$)

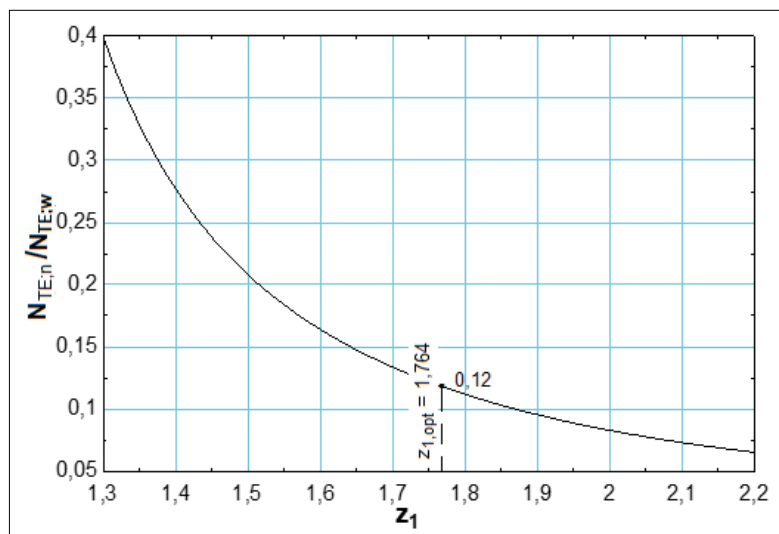


Rys. 7. Strumień masy helu \dot{m}_{hel} w funkcji parametru z_1 , dla $T_4 = T_6 = 1300$ K



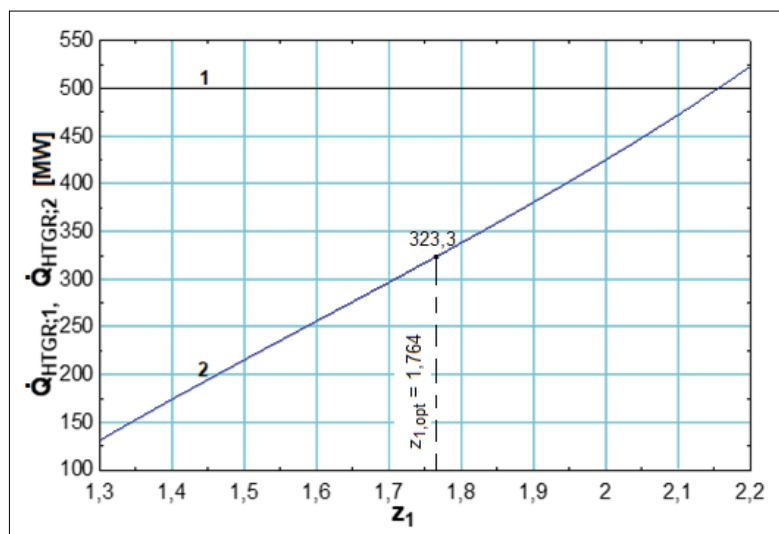


Rys. 8. Jednostkowy strumień masy helu przypadający na jednostkę mocy elektrowni $D = \dot{m}_{hel} / N_e$ w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1300$ K



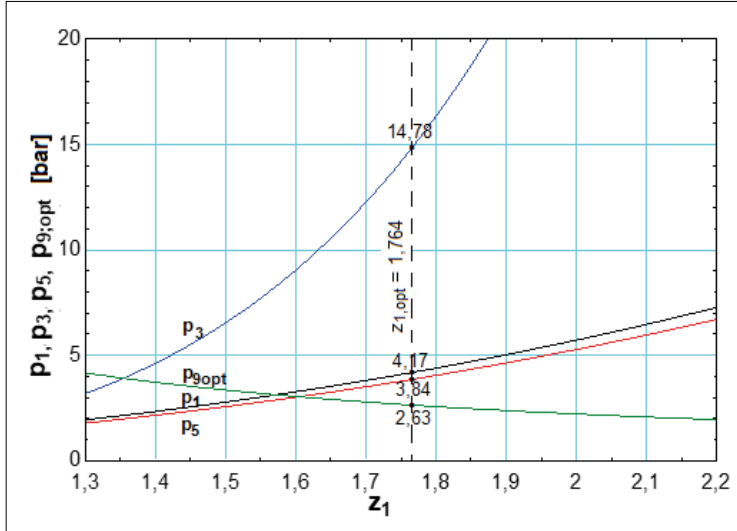
Na rys. 9. przedstawiono stosunek mocy turbosprężarki niskociśnieniowej do mocy turbosprężarki wysokociśnieniowej.

Rys. 9. Stosunek mocy N_{TE_n} / N_{TE_w} w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1300$ K

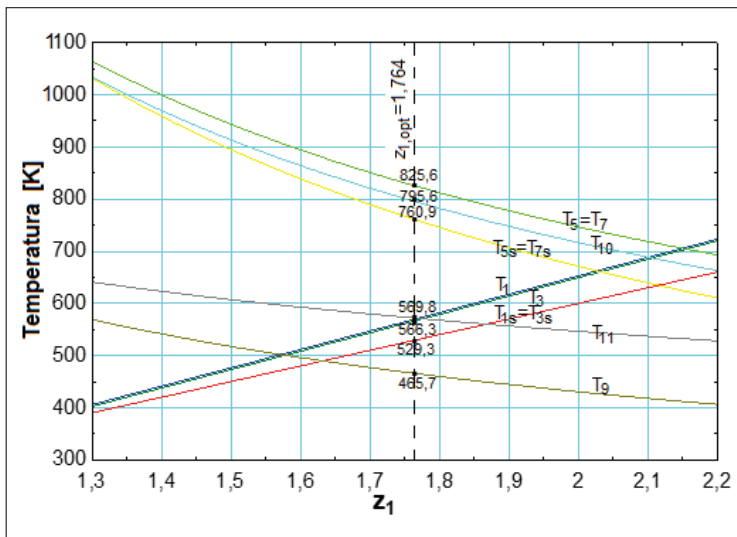


Rys. 10. Moce ciepłe reaktorów \dot{Q}_{HTGR_1} , \dot{Q}_{HTGR_2} funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1300$ K ($1 - \dot{Q}_{HTGR_1}$; $2 - \dot{Q}_{HTGR_2}$)

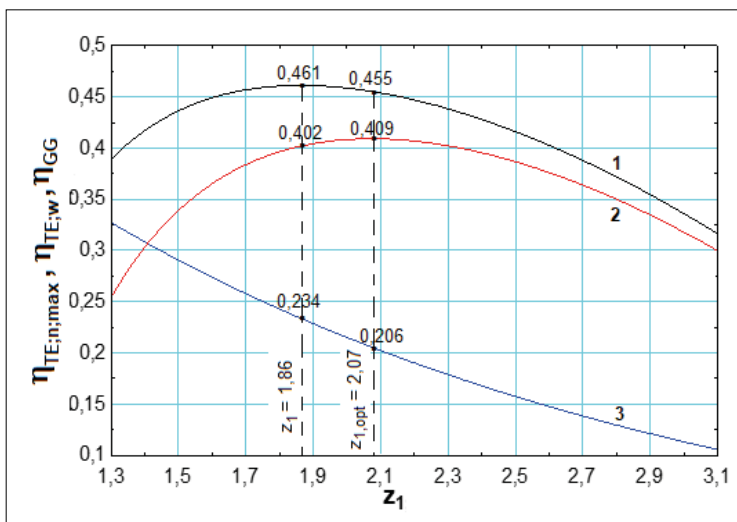




Rys. 11. Ciśnienia $p_1, p_3, p_5, p_{9,opt}$ w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1300$ K



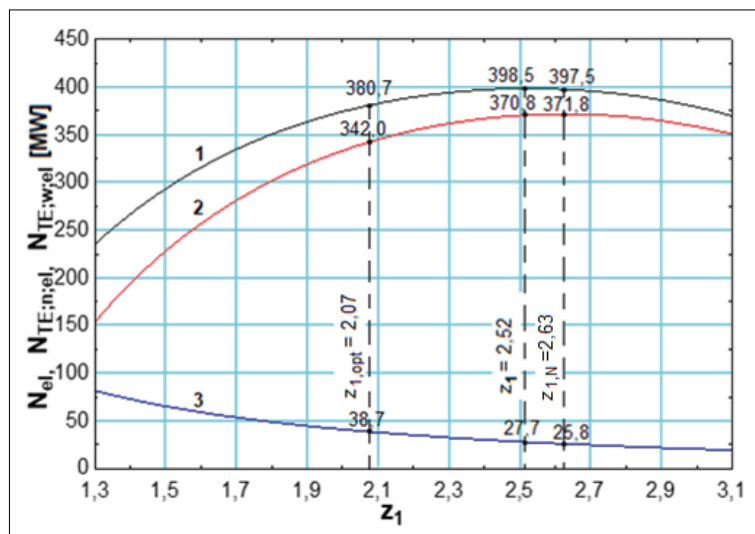
Rys. 12. Temperatury $T_1, T_{1s}, T_3, T_{3s}, T_5, T_{5s}, T_7, T_{7s}, T_9, T_{10}, T_{11}$, w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1300$ K



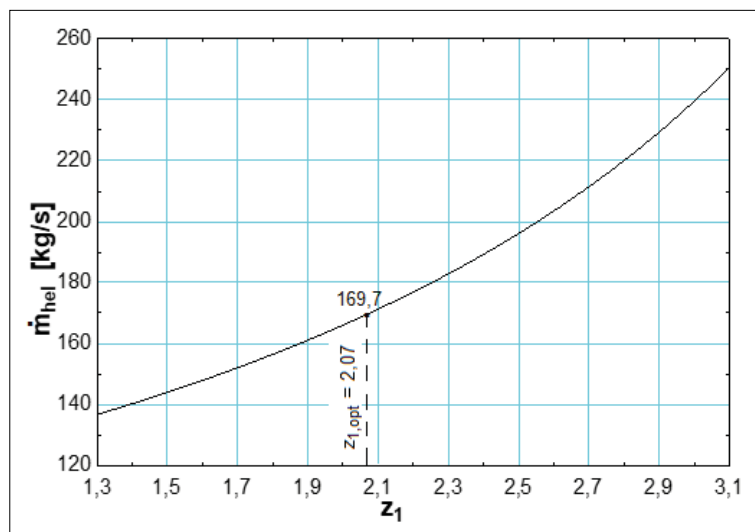
Na rys. 13-20 w celach porównawczych przedstawiono wyniki obliczeń termodynamicznych dla temperatur $T_4 = T_6 = 1800$ K.

Rys. 13. Sprawności $\eta_{G-G}, \eta_{TE,n}^{max}, \eta_{TE,w}$, w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1800$ K ($1 - \eta_{G-G}; 2 - \eta_{TE,w}; 3 - \eta_{TE,n}^{max}$)

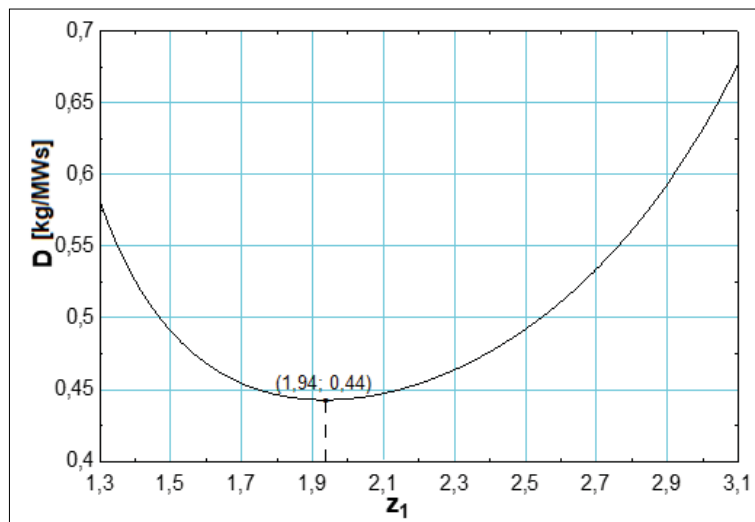




Rys. 14. Moce N_{el} , $N_{TE:n,el}$, $N_{TE:w,el}$ w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1800$ K
(1 - $N_{TE:w,el}$; 2 - $N_{TE:n,el}$; 3 - N_{el})

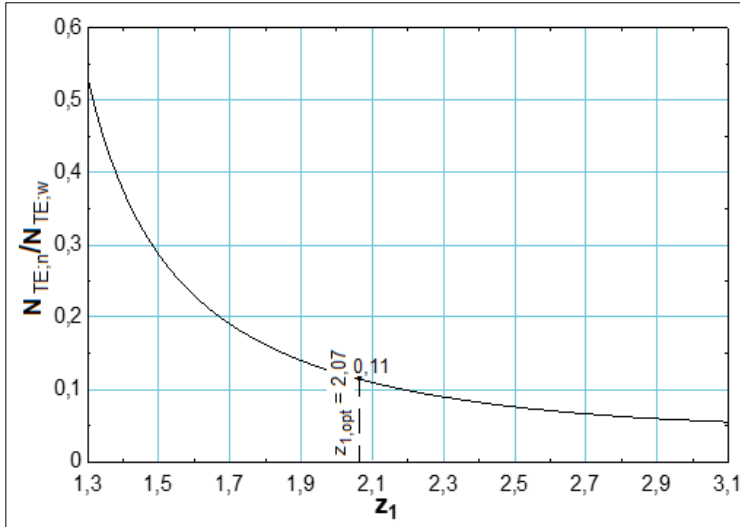


Rys. 15. Strumień masy helu \dot{m}_{hel} w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1800$ K

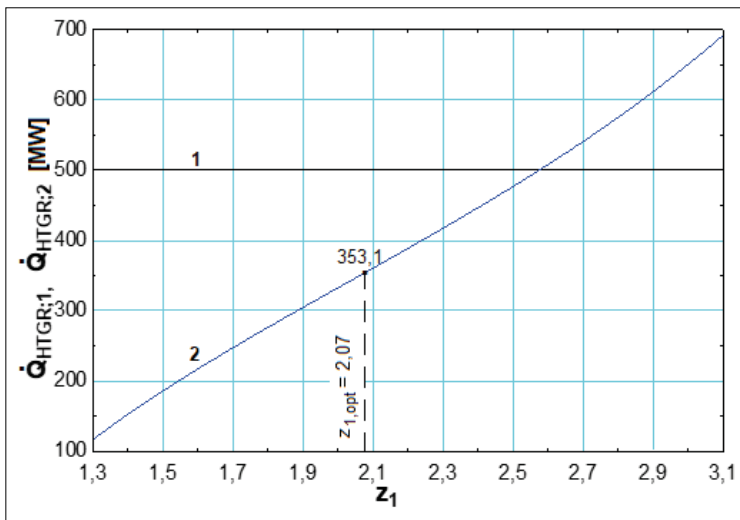


Rys. 16. Jednostkowy strumień masy helu przypadający na jednostkę mocy elektrowni $D = \dot{m}_{hel} / N_{el}$ w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1800$ K

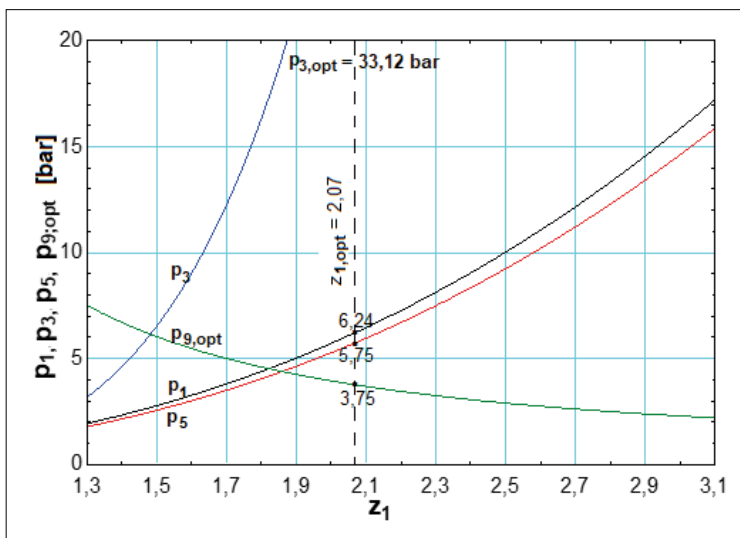




Rys. 17. Stosunek mocy $N_{TE,m} / N_{TE,w}$ w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1800$ K

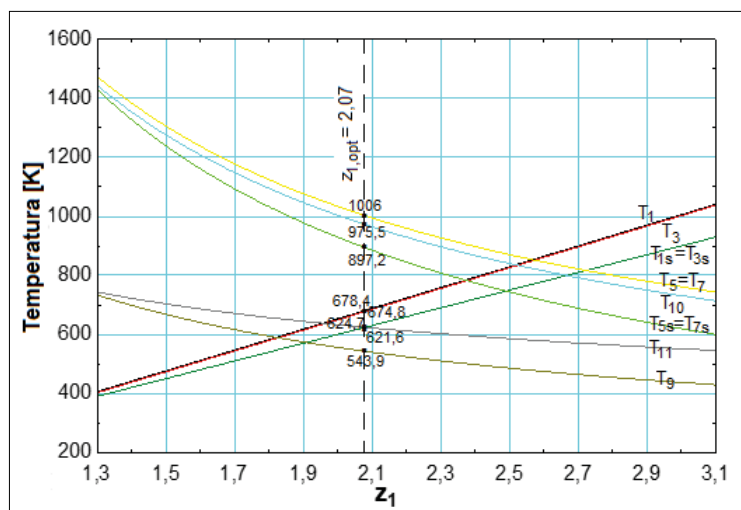


Rys. 18. Moce cieplne reaktorów $\dot{Q}_{HTGR,1}$, $\dot{Q}_{HTGR,2}$ w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1800$ K (1 – $\dot{Q}_{HTGR,1}$; 2 – $\dot{Q}_{HTGR,2}$)



Rys. 19. Ciśnienia $p_1, p_3, p_5, p_{9,opt}$ w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1800$ K





Rys. 20. Temperatury $T_1, T_{1s}, T_3, T_{3s}, T_5, T_{5s}, T_7, T_{7s}, T_9, T_{10}, T_{11}$, w funkcji parametru z_1 dla $T_4 = T_6 = 1800$ K

Jednostkowy koszt produkcji energii elektrycznej i krótkie podsumowanie

Metodykę obliczania jednostkowych kosztów produkcji energii elektrycznej w elektrowniach pracujących według dowolnych technologii energetycznych, zarówno w blokach niezamortyzowanych, jak i już zamortyzowanych, przedstawiono w [2]. Koszty te dla przedstawionego na rys. 2 układu dla mocy cieplnej reaktora $\dot{Q}_{HTGR} = 500$ MW wynoszą: $k_{el} \approx 200$ PLN/MWh i $k_{el,amort} \approx 100$ PLN/MWh, przy czym przyjęto, że okres amortyzacji elektrowni wynosi 60 lat.

Podsumowując, niezależnie od tego, czy elektrownia hierarchiczna jest z jednym (rys. 1), czy z dwoma wysokotemperaturowymi reaktorami jądrowymi (rys. 2), to jednostkowe koszty produkcji w nich elektryczności są niemalże sobie równe. Elektrownia jądrowa z dwoma reaktorami ma jednak dwie przewagi nad elektrownią z reaktorem pojedynczym. Jej sprawność energetyczna jest o ok. 2 punkty procentowe większa i moc elektryczna jest większa ok. dwa razy, pomimo tego, że moc cieplna reaktora drugiego \dot{Q}_{HTGR_2} dla optymalnych parametrów termicznych obiegów Joule’a wysoko- i niskotemperaturowego jest istotnie mniejsza od mocy reaktora pierwszego \dot{Q}_{HTGR_1} (rys. 10, 18).

Wnioski końcowe

Należy wciąż i wciąż, jak mantrę, powtarzać, że należy budować elektrownie i elektrociepłownie jądrowe, że ich budowa jest absolutną koniecznością. Zapewniają bowiem, co szalenie ważne, stabilne zasilanie odbiorców w „czystą” i jednocześnie taną energię elektryczną, i w bardzo tanie ciepło sieciowe przez cały rok. Okres eksploatacji elektrowni jądrowych jest przy tym długi, wynosi co najmniej 60 lat. Co więcej, energetyka jądrowa jest przyjazna środowisku, jest bezemisyjnym źródłem elektryczności i ciepła. Nie emituje w ogóle pyłów, związków siarki, azotu, dwutlenku węgla. Paliwa jądrowego wystarczy przy tym na miliardy lat. Mało tego, koszt paliwa jądrowego w rocznych kosztach działania elektrowni i elektrociepłowni stanowi zaledwie ok. 5% tych kosztów, a tym samym 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 i ciepła sieciowego. Co więcej, należy budować elektrownie jądrowe w hierarchicznej technologii gazowo-gazowej z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym i z helem jako czynnikiem obiegowym zamiast inwestycyjnie drogich elektrowni wyłącznie z obiegiem Clausiusa-Rankine’a. 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. Co więcej, i co należy *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 ok. 200 PLN/MWh i jest o kilkadziesiąt procent niższy od kosztu w jednoobiegowej elektrowni jądrowej z obiegiem Clausiusa-Rankine’a. Mało tego, jest najniższy spośród kosztów uzyskiwanych we wszystkich innych dostępnych technologiach energetycznych. Szczególnie jest niższy, i to wielokrotnie, od kosztu elektryczności z nieprzewidywalnych czasowo i o bardzo krótkich rocznych czasach pracy



źródeł OZE, tj. turbosespołów wiatrowych i fotowoltaiki. Należy jednoznacznie i dobitnie w tym miejscu powiedzieć, że OZE to rak, który toczy energetykę i finanse państwa (sic!). Toczy się pieniędzmi, które powinny być przeznaczone na rozwój energetyki, a nie być wypłacane przez Skarb Państwa w formie subwencji do każdej wyprodukowanej w nich megawatogodziny energii elektrycznej. Subwencje te obecnie są rzędu ponad 10 miliardów złotych rocznie i wypłacane są niemieckim właścicielom OZE w Polsce (od 2006 r. wypłaciliśmy już ok. 100 miliardów złotych). Bez tych subwencji OZE nie istniałyby, bo nikt nie kupiłby wielokrotnie droższej energii elektrycznej w nich produkowanej. Cena ta dzięki subwencjom jest sztucznie obniżana do ceny rynkowej. Również wymyślony przez Niemców system handlu emisjami CO₂, tzw. system *EU ETS* (*European Union Emission Trading Scheme*) i wprowadzony w Unii Europejskiej przy pomocy Francji (energetyka francuska to w ok. 80% atom, więc problem emisji CO₂ niemalże Francji w ogóle nie dotyczy) i podpisany przez polski rząd 21 marca 2014 r. niszczy polską energetykę, by w konsekwencji ją zlikwidować. System ten obejmuje nie tylko energetykę, ale także przedsiębiorstwa, które mają własne źródła energii elektrycznej i ciepła. Powoduje on wręcz galopujące ceny energii elektrycznej i ciepła, które „przenoszą” się na ceny towarów i usług. Kwoty wyprowadzane z Polski w wyniku działania systemu EU ETS wyniosły w ub. r. per saldo ok. 25 miliardów złotych. Polska emisja to ok. 170 mln ton CO₂ i pomimo tzw. darmowych 40 mln ton musimy dokupować ok. 130 mln ton na giełdach frankfurckiej i londyńskiej, gdzie handlują nimi (właściwszym słowem jest spekulują) niemieckie instytucje finansowe: niemieckie banki i fundusze inwestycyjne! W konsekwencji OZE i *EU ETS* systematycznie niszczą polską energetykę, a więc niszczą państwo polskie. Musimy wyłączać z ruchu elektrownie, a istnienie państwa bez własnej energii elektrycznej jest niemożliwe! Gdyby państwo było zmuszone kupować całość energii z zewnątrz, a przynajmniej znaczą jej ilość, to wystarczyłoby wówczas „odciąć” Polskę od tej importowanej energii, na przykład z Niemiec i państwo przestałoby *de facto* istnieć!

Również energetyka wodorowa, która ostatnio jest tak „modna”, jest kolejnym jednym wielkim absurdem. Nie ma bowiem takiego paliwa, jak wodór. Należy go wyprodukować, co wiązałoby się z przeogromnymi kosztami. Największy koszt jego produkcji, ogromnie wysoki, byłby z wody w procesie jej elektrolizy. Należy przy tym dodać, że z ilości 180 MJ energii elektrycznej uzyskuje się w tym procesie tylko kilogram wodoru, z którego na powrót można otrzymać zaledwie ok. 60 MJ elektryczności, tj. tylko 33% energii elektrycznej wykorzystanej do jego produkcji. Pozostałe 67% energii jest bezpowrotnie tracone (sic!). Produkcja taka jest zatem wyjątkowym absurdem. Ponadto, aby z tego wodoru produkować energię elektryczną należałoby zainwestować ogromne środki finansowe na elektrownie go spalające. Skąd wziąć ponadto energię elektryczną do procesu elektrolizy?! Na pewno nie z OZE, które produkują śladowe ilości energii elektrycznej po ogromnie przy tym wysokiej cenie. Gdyby nawet z kuli ziemskiej zrobić „jeża”, którego skórą byłyby panele fotowoltaiczne, a kolcami turbosespoły wiatrowe, to produkcja w nich elektryczności byłaby śladowa w porównaniu z aktualnym zapotrzebowaniem na nią przez ludzkość. Obecnie wodór pozyskiwany jest w procesie reformingu gazu ziemnego parą wodną zgodnie z reakcją endotermiczną $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ (w Polsce produkuje się tak ok. 1 mln ton wodoru rocznie). Potrzeby energetyczne na ciepło dla tej reakcji wynoszą 207 MJ/kmol CH₄, są więc duże. Ciepło to dostarczane jest wraz z parą wodną z upustów turbiny z elektrowni. Zamiast zatem produkować za pomocą tej pary bezpośrednio energię elektryczną, to wykorzystuje się ją do produkcji wodoru z metanu, by dopiero z niego produkować elektryczność. Innymi absurdalnymi możliwościami byłaby produkcja pary dla reformingu z wykorzystaniem ciepła spalania metanu lub innego paliwa kopalnego, lub, co najbardziej byłoby irracjonalne, z wykorzystaniem grzałek elektrycznych. Zabrałoby mocy elektrycznej w elektrowniach na całym świecie, by wyprodukować wodór, który zaspokoiłby potrzeby energetyczne ludzkości.

Z uwagi na powyższe, kolejny raz należy sformułować tezę, że elektrownie jądrowe, szczególnie w hierarchicznej technologii *gazowo-gazowej* z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym i helem jako czynnikiem obiegowym powinny być stosowane na szeroką skalę, powinny „zrewolucjonizować” energetykę. Również i budowa elektrociepłowni w tej technologii pozwoli w jeszcze większym stopniu to zrobić (w miejskich systemach ciepła sieciowego \dot{Q}_c mogą być wykorzystywane reaktory *HTGR* o relatywnie małych mocach cieplnych).

Sumując, budowa elektrowni jądrowych w kraju jest polską racją stanu. Absolutnie nie chcą do tego dopuścić Niemcy i dlatego m. in. zablokowali możliwość wydawania unijnych pieniędzy na energetykę jądrową. Cele niemieckiej polityki energetycznej, i nie tylko, przedstawił w swojej książce Jakub Wiech: *Energiewende. Nowe niemieckie imperium*. W syntetycznym ujęciu można o nich przeczytać w [4]. □

Literatura

1. Bartnik R., Kowalczyk T.: Thermodynamic and economic analysis of a hierarchical gas-gas nuclear power plant with a high-temperature reactor and helium as a circulating medium, *Nuclear Engineering and Design*, 2021, vol. 382.
2. Bartnik R., Kowalczyk T.: Efektywność termodynamiczna i ekonomiczna innowacyjnych hierarchicznych gazowo-gazowych elektrowni jądrowych z wysokotemperaturowym reaktorem i helem jako czynnikiem obiegowym, *Nowa Energia*, nr 2/2021.
3. Bartnik R.: Hierarchiczne dwuobiegowe gazowo-gazowe i gazowo-parowe elektrownie i elektrociepłownie jądrowe z wysokotemperaturowymi reaktorami i helem oraz wodą i parą jako czynnikami obiegowymi, *Nowa Energia*, nr 5-6/2021.
4. Jak Niemcy oszukują świat? Wzmocnienie wpływów zamiast ochrony klimatu (dorzeczy.pl).