

Porównanie wybranych typów elektrowni jądrowych z reaktorem HTGR

Comparison of selected types of nuclear power plants with high-temperature gas-cooled reactors (HTGR)

W marcu 2011 roku północno-wschodnią część Japonii nawiedziło trzęsienie ziemi o magnitudzie 9, które spowodowało powstanie największych wstrząsów od 140 lat. Uszkodzona została wówczas elektrownia jądrowa *Fukushima Daiichi*. Na skutek zniszczeń powstałych przez falę tsunami doszło do utraty kontroli nad jednym z eksploatowanych bloków elektrowni, w wyniku czego nastąpił wyciek radioaktywnych substancji do środowiska [1, 2]. Katastrofa nuklearna w *Fukushima Daiichi* spowodowana przez siły natury wywołała dyskusje na temat ryzyka i bezpieczeństwa stosowania energetyki jądrowej.

Energia pozyskiwana z atomu ma bardzo wiele zalet; głównymi są znikoma emisja CO₂ oraz koszt paliwa do produkcji energii, który w porównaniu z kosztem innych dostępnych surowców jest dużo niższy [3]. Dlatego też nie należy rezygnować z pozyskiwania energii z atomu, lecz poprawić bezpieczeństwo użytkowania instalacji zasilanych paliwem jądrowym. Jednym z rozwiązań pozwalających na zmniejszenie ryzyka uszkodzenia elektrowni zasilanej paliwem atomowym w wyniku wystąpienia trzęsienia ziemi, tsunami, powodzi czy też innej katastrofy naturalnej może być przeniesienie tego typu układów z lądu w głąb oceanu [4].

Mimo iż prace nad wykorzystaniem energii jądrowej rozpoczęto od próby wprowadzenia układów nuklearnych do zastosowań morskich, zdecydowanie zdominowały one jednostki wytwórcze na lądzie. Do początku XXI w. energetyka jądrowa na morzu znajdowała zastosowanie głównie do celów militarnych [5]. Powstało jedynie kilka jednostek cywilnych o napędzie nuklearnym (*NS Savannah*, *Otto Hahn*, *Mutsu*, rosyjskie lodolamacze, np. *Yamal*) [6]. Stosowanie układów nuklearnych poza lądem nie jest zbyt popularne, ale są podejmowane próby stworzenia morskich elektrowni jądrowych. Za prekursorów tego typu rozwiązań uważa się Amerykanów i Rosjan.

Pierwszą pływającą elektrownię zasilaną paliwem jądrowym zbudowano w USA, a jej moc elektryczna wynosiła 10 MW. Układ ten wykorzystywano w amerykańskiej bazie militarnej zlokalizowanej w Kanale Panamskim [7]. Rosjanie są autorami pierwszej pływającej elektrowni atomowej zbudowanej na potrzeby cywilne. Z racji tego, że blisko 50% terytorium tego kraju znajduje się na dalekiej północy Rosja boryka się z problemem

dostaw energii elektrycznej w miejsca, w których warunki naturalne są wyjątkowo ciężkie i znacznie utrudniają budowę infrastruktury i jednostek wytwórczych na lądzie [8]. Stąd też konieczny jest rozwój alternatywnych źródeł energii. Wydaje się, że zastosowanie morskich elektrowni jądrowych może sprawdzić się w bardzo trudnych okolicznościach, ponieważ układy te nie wymagają rozbudowanej infrastruktury. Dodatkowo istnieje możliwość eksploatacji takiego układu przez długi czas bez konieczności wymiany paliwa jądrowego [9, 10].

W ślad za Amerykanami i Rosjanami podążają Chinczy. Chiński rząd ze względu na bardzo poważny problem związany z występowaniem smogu postanowił walczyć z nim poprzez stworzenie jak największej liczby alternatywnych źródeł energii. Można do nich zaliczyć elektrownie jądrowe umiejscowione z dala od terenów zamieszkałych, w co idealnie wpisuje się zastosowanie idei pływających jednostek wytwórczych. Stąd też powstały plany, aby w najbliższym czasie zbudować flotę składającą się z co najmniej dwudziestu jednostek tego typu [15, 16]. Układy te mają zapewnić stabilne dostawy energii dla projektów realizowanych na Morzu Południowochińskim (na przykład zasilając platformy wiertnicze).

Warto poddać analizie także inne aspekty przemawiające za możliwością zastosowania układów morskich do produkcji energii elektrycznej. W dobie przeludnienia pojawia się dylemat czy warto zajmować pod obiekty energetyczne kolejne wartościowe tereny, które mogłyby zostać użyte jako tereny mieszkalne czy rolnicze. Jest to szczególnie ważne w odniesieniu do terenów wyspiarskich. W tym przypadku warto również przyrzeć się aspektom krajobrazowym. W regionach turystycznych zastosowanie wysp energetycznych przyniosłoby bardzo pozytywne skutki, np. brak zaburzenia krajobrazu.

Typem reaktorów, które z sukcesem mogłyby zostać zastosowane w elektrowniach jądrowych usytuowanych na morzu jest wysokotemperaturowy reaktor chłodzony gazem HTGR. Pierwsze tego typu reaktory zostały zbudowane w latach 70. dwudziestego wieku, jednak ze względów ekonomicznych nie zostały wdrożone do powszechnego użytku, lecz obecnie cieszą się dużym zainteresowaniem. Obecnie nadal trwają intensywne prace nad rozwojem tych reaktorów mające na celu poprawę efektywności i bezpieczeństwa. W reaktorach typu HTGR zastosowano paliwo TRISO (Triple coated ISOtropic fuel). Występuje ono

¹⁾ e-mail: mardrosi@pg.edu.pl, tel. 58 347 2235

²⁾ e-mail: natszew1@pg.edu.pl, tel. 58 347 2842

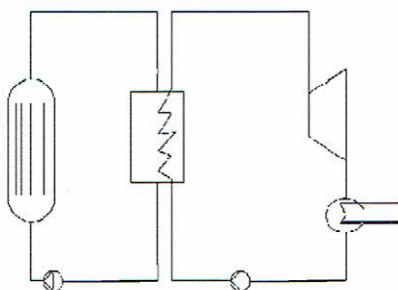
w postaci grafitowych kulek wypełnionych materiałem rozszczepialnym o średnicy 0,5 mm, którym zazwyczaj jest nisko wzbogacony tlenek uranu [11, 12]. Największą zaletą reaktorów HTGR jest bezpieczeństwo użytkowania, ponieważ zastosowano tutaj pasywne systemy bezpieczeństwa wykorzystujące siłę grawitacji, co umożliwia usunięcie paliwa w przypadku utraty zasilania bloku jądrowego. Ponadto, jeśli w układzie chłodzenia zostanie zastosowany hel w razie wystąpienia wycieku nie dojdzie do skażenia środowiska naturalnego, gdyż hel jako gaz szlachetny jest chemicznie obojętny i nie podlega aktywacji radioaktywnej, natomiast wszelkie radioaktywne produkty reakcji jądrowej pozostają szczelnie zamknięte w kulkach paliwowych.

Reaktory typu HTGR charakteryzują się bardzo wysokim stopniem wypalenia paliwa [12]. Poza tym generowana jest mniejsza ilość odpadów radioaktywnych, co ze względu na ograniczoną ilość miejsca, a także na późniejsze koszty składowania odpadów oraz ograniczenie ilości dostaw surowca potrzebnych do pracy układu, jest bardzo korzystne.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie dwóch różnych elektrowni jądrowych i porównanie ich pod względem uzyskiwanych sprawności. Mogą być stosowane do produkcji energii na tzw. wyspach energetycznych. Oba rozważane układy pracują we współpracy z reaktorem HTGR. Jeden został zamodelowany w programie numerycznym Projdiag, a następnie dla tego modelu przeprowadzono obliczenia numeryczne w programie DIAGAR, który jest pomocnym narzędziem do obliczeń dotyczących układów z turbiną parową.

Opis obiektu badań

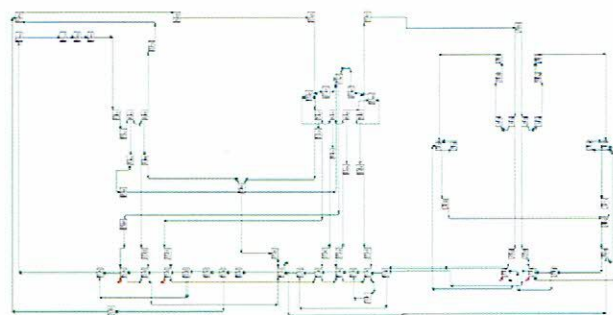
Jednym z dwóch omawianych układów jest obieg turbiny parowej z wysokotemperaturowym reaktorem HTGR chłodzonym helem. Schemat ideowy obiegu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy obiegu cieplnego z reaktorem HTGR

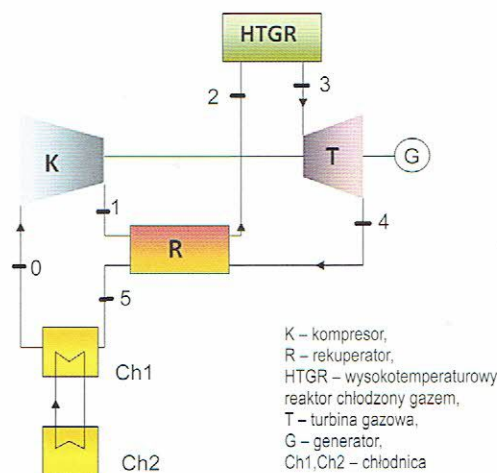
Obieg cieplny zaprojektowany został na moc 560 MW. Przyjęto wartość temperatury pary świeżej na poziomie 600°C, a ciśnienia 285 barów. W rozważanym obiegu zastosowano 7 wymienników regeneracyjnych, których zadaniem jest podniesienie temperatury czynnika roboczego przed wytwornicą pary; są one zasilane parą z upustów regeneracyjnych zaczeplonych w kadłubach turbiny. Obok typowych wymienników regeneracyjnych w układzie użyto odgazowywacz. Zastosowano również przegrzew międzystopniowy oraz separator wilgoci. Oba rozwiązania wpływają na zwiększenie stopnia suchości pary na ostatnich stopniach kadłuba turbiny niskoprężnej (NP), co skut-

kuje poprawą bezpieczeństwa eksploatacji oraz lepszą sprawnością turbin pracujących w obiegu. W celu dokonania obliczeń numerycznych stworzono tożsamy schemat omawianej siłowni w programie Projdiag. W tym przypadku struktura rozpatrywanego obiegu (rys. 2) składa się z prostokątów oraz połączeń między nimi. Każdy z prostokątów modeluje konkretny aparat, czyli urządzenie występujące w obiegu parowym. W kolejnym kroku obliczeń schemat został wprowadzony do programu DIAGAR. Program ten używany jest do wykonania obliczeń obiegu parowego. W tym celu wykorzystuje on teorię grafów i łączy parametry termodynamiczno-przepływowe obiegu z charakterystykami aparatów oraz z ich geometrią [13].



Rys. 2. Schemat numeryczny obiegu stworzony w programie numerycznym

Drugim z rozpatrywanych obiegu jest układ turbiny gazowej z rekuperacją (rys. 3). W układzie tym komorę spalania zastąpiono wysokotemperaturowym reaktorem HTGR chłodzonym gazem, zastosowano również rekuperację, która pozwoliła na użycie ciepła odpadowego czynnika na wylocie z turbiny gazowej do podgrzania czynnika na wlocie do reaktora. Zastosowanym chłodziwem w rozważanym obiegu jest hel (He) ze względu na jego właściwości fizyczne. W porównaniu z powietrzem, azotem czy też dwutlenkiem węgla hel wykazuje 5-6 krotnie wyższe współczynniki przewodzenia ciepła. Zastosowanie helu jako chłodziwa zapewnia najmniejsze wymiary wymienników ciepła jak i samego reaktora; w przypadku innych czynników wymiary te są większe.



Rys. 3. Schemat układu gazowego z reaktorem HTGR, w którym zastosowano rekuperację

Parametry rozważanego układu zostały określone głównie zgodnie z wymaganiami reaktora wysokotemperaturowego HTGR. Wartość ciśnienia helu na wejściu do reaktora p_2 przyjęto na poziomie 70 barów. Wartość ta została wybrana ze względu na ograniczenie objętości czynnika chłodzącego, ponieważ zbyt duża objętość doprowadziłaby do przewymiarowania wymienników ciepła oraz samego reaktora. Wartość sprężu dla sprężarki π_k na poziomie 2,27 przyjęto ze względu na wartości ciśnienia czynnika na wlocie do reaktora, biorąc pod uwagę dolną temperaturę t_1 i ciśnienie p_1 czynnika. W obliczeniach wstępnych przyjęto, że reaktor typu HTGR podgrzewa hel do temperatury $t_3 = 1223$ K; w dalszych obliczeniach dokonano optymalizacji sprawności obiegu ze względu na górną temperaturę czynnika t_3 . Dla potrzeb optymalizacji przyjęto, że temperatura ta może wahać się od ok. 1073 K do 1273 K [14]. Przyjęto, że ekspansja czynnika w turbinie gazowej zachodzi do ciśnienia nieco wyższego niż ciśnienie na wlocie do sprężarki. Założenie to uwzględnia, że hel opuszczając turbinę gazową przepływa następnie przez rekupektor oraz chłodnicę, co przyczynia się do nieznacznych strat ciśnienia czynnika. Przyjęto, że spręż turbiny π_t , aby spełnić powyższe założenie, powinien wynosić 2,5. Dla czynnika chłodzącego, jakim jest hel założono, że ciepło właściwe c_p przyjmuje stałą wartość niezależną od temperatury czynnika, równą 5,19 kJ/kgK, natomiast wykładnik adiabaty κ równy jest 1,66.

Tabela 1

Parametry termodynamiczne obliczone w charakterystycznych punktach obiegu dla założonych wartości sprężu oraz temperatury czynnika za reaktorem HTGR

Parametry obiegu gazowego z reaktorem HTGR			
Moc turbiny gazowej	N_e	560	MW
Ciśnienie czynnika na wlocie do kompresora	p_0	2,8	MPa
Temperatura czynnika na wlocie do kompresora	T_0	299,15	K
Entalpia czynnika na wlocie do kompresora	i_0	1552,59	kJ/kg
Ciśnienie czynnika na wylocie z kompresora	p_1	70	bar
Temperatura czynnika na wylocie z kompresora	T_1	453,83	K
Entalpia czynnika na wylocie z kompresora	i_1	2355,4	kJ/kg
Ciśnienie na wlocie do reaktora HTGR	p_2	70	bar
Temperatura czynnika na wlocie do reaktora HTGR	T_2	837,94	K
Entalpia czynnika na wlocie do reaktora HTGR	i_2	4348,9	kJ/kg
Ciśnienie czynnika za reaktorem HTGR	p_3	68	bar
Temperatura czynnika za reaktorem HTGR	T_3	1223	K
Entalpia czynnika za reaktorem HTGR	i_3	6348,15	kJ/kg
Ciśnienie czynnika na wylocie z turbiny gazowej	p_4	30	bar
Temperatura czynnika na wylocie z turbiny gazowej	T_4	917	K
Entalpia czynnika na wylocie z turbiny gazowej	i_4	4759	kJ/kg

Obliczenia numeryczne zostały wykonane na podstawie założonych wartości sprężu oraz temperatury chłodziwa za reaktorem HTGR. Wykorzystano w nich równania adiabaty dla określenia parametrów izentropowych dla sprężarki oraz turbiny w rozpatrywanym układzie. W obliczeniach w celu określenia rzeczywistej pracy wspomnianych urządzeń posłużono się teoretycznymi sprawnościami. Sprawność turbiny gazowej η_T przyjęto na poziomie 90%, natomiast sprawność kompresora η_K przyjęto na poziomie 85%. Dla określenia temperatur czynnika roboczego za i przed rekupektorem również założono sprawność teoretyczną rekupektora η_R równą 85%. Dla przyjętych wielkości wyznaczono parametry termodynamiczne w charakterystycznych punktach oraz spraw-

ność całego obiegu. Sprawność obiegu została poddana optymalizacji ze względu na różne wartości temperatury chłodziwa za reaktorem T_2 . Na potrzeby obliczeń przyjęto, że właściwości fizyczne czynnika roboczego, jakim jest hel są niezależne od temperatury i ciśnienia panującego w poszczególnych elementach układu. Zarówno ciepło właściwe c_p , jak i wykładnik adiabaty został przyjęty jako niezmienny. Założenie to przyjęto na podstawie przeanalizowanych zmian parametrów czynnika względem zmiennych warunków otoczenia, w jakim dany czynnik pracuje.

Wyniki obliczeń

Symulacja obiegu parowego współpracującego z reaktorem HTGR chłodzonym helem polegała na optymalizacji wartości ciśnienia panującego w skraplaczu. Ciśnienie to było zmieniane od wartości 0,03 do 0,1 bar, co 0,01 bar. Dla rozważanej mocy obiegu 560 MW przyjęto, że strumień masowy równy jest 370 kg/s. Wyniki symulacji pozwoliły również na określenie wartości sprawności netto oraz brutto (rys. 4, 5), które zaprezentowano w tabeli 2. Sprawność brutto odniesiona została do jednostkowego zużycia ciepła (1), natomiast sprawność netto, uwzględniająca potrzeby własne siłowni turbo parowej, wynosi ok. 9% mniej w stosunku do sprawności brutto (2).

$$\eta_{brutto} = \frac{3600}{\text{Jednostkowe Zużycie Ciepła}} * 100 \quad (1)$$

$$\eta_{netto} = 91\% * \eta_{brutto} \quad (2)$$

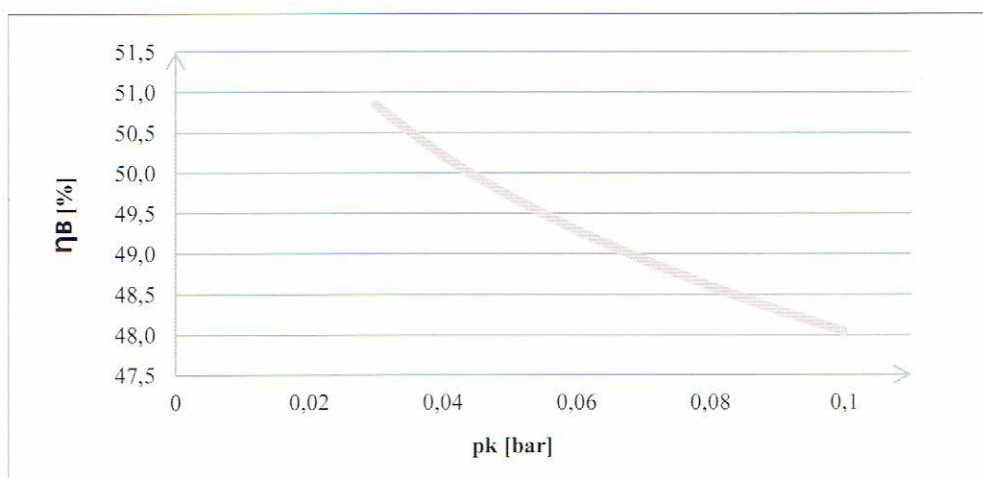
Tabela 2

Wyniki symulacji siłowni turbinowej o mocy 560 MW

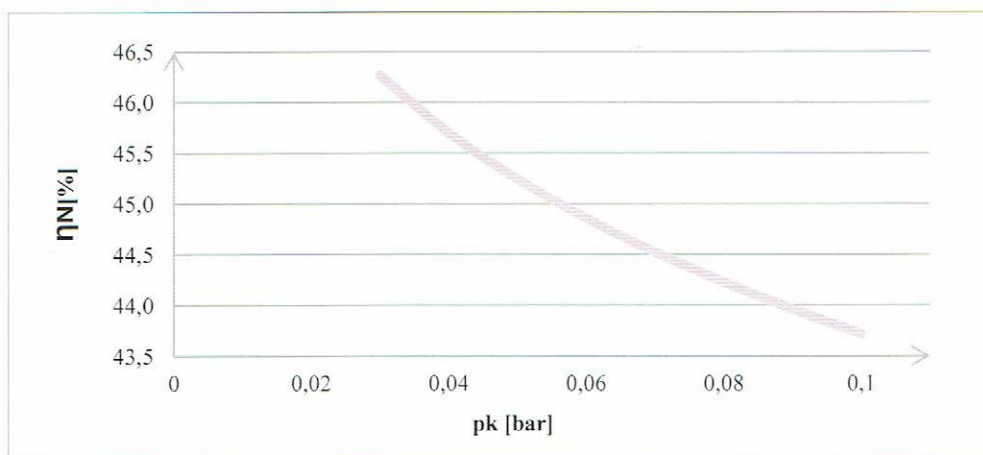
Ciśnienie w skraplaczu, bary	Sprawność brutto, %	Sprawność netto, %
0,03	50,8416	46,2659
0,04	50,2209	45,7010
0,05	49,7198	45,2450
0,06	49,2964	44,8597
0,07	48,9287	44,5251
0,08	48,6034	44,2291
0,09	48,3103	43,9624
0,1	48,0445	43,7205

Charakterystyki z rysunków pokazują, że wraz ze wzrostem ciśnienia w skraplaczu sprawność układu maleje. Najbardziej optymalną wartością ciśnienia w skraplaczu jest 0,03 bara. Różnica pomiędzy największą a najmniejszą wartością ciśnienia wynosząca 0,7 powoduje, że uzyskuje się zmniejszenie wartości sprawności netto o 2,545%, a brutto o 2,797%. Straty te w rzeczywistości mogą wpłynąć na wzrost kosztów eksploatacyjnych związanych z większym zużyciem paliwa. Wzrost ilości zużytego paliwa jest nieekonomiczny ze względu na późniejsze koszty związane ze składowaniem odpadów radioaktywnych.

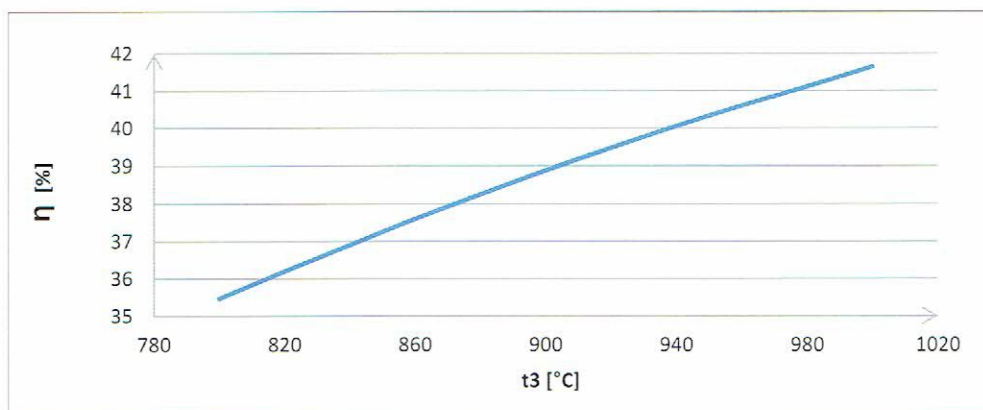
Rys. 4. Zależność sprawności brutto η_B od ciśnienia panującego w skraplaczu p_k



Rys. 5. Zależność sprawności netto η_N od ciśnienia panującego w skraplaczu p_k



Rys. 6. Zależność sprawności obiegu gazowego z reaktorem HTGR od temperatury czynnika roboczego na wylocie z reaktora



Na podstawie obliczeń numerycznych wyznaczono sprawność obiegu gazowego z reaktorem HTGR chłodzonym helem. Sprawność została zoptymalizowana ze względu na temperaturę chłodziwa za reaktorem HTGR. Temperatura ta została przyjęta w zakresie temperatur możliwych do osiągnięcia w tego typu reaktorze. Najkorzystniejszą wartość sprawności uzyskano dla temperatury czynnika równej 1000°C. Stworzona charakterystyka (rys. 6) jest zgodna z przewidywaniami opartymi na wiedzy na temat obiegu turbin gazowych. Przewidywania te zakładają, że wraz ze wzrostem temperatury czynnika za komorą spalania czy innym źródłem produkcji ciepła sprawność układu powinna również wzrastać.

Sprawność obiegu gazowego z reaktorem HTGR została wyznaczona z równania (3):

$$\eta = \frac{N_{eTG}}{Q_{dHTGR}} = \frac{N_{TG} - N_K}{Q_{dHTGR}} \quad (3)$$

gdzie:

N_{eTG} – moc efektywna układu,

Q_{dHTGR} – ciepło odebrane przez czynnik roboczy od reaktora HTGR,

N_{TG} – moc turbiny gazowej,

N_K – moc kompresora.

Analizując uzyskane wyniki obliczeń numerycznych dla rozpatrywanych układów nuklearnych z wysokotemperaturowym reaktorem HTGR można wysnuć podane poniżej wnioski.

1. Wraz ze wzrostem ciśnienia panującego w skraplaczu maleje sprawność parowego obiegu jądrowego, co w przypadku układów parowych dużej mocy oznacza znaczne pogorszenie warunków ekonomicznych eksploatacji omawianego układu, wynikających z konieczności poniesienia dużo większych nakładów finansowych na paliwo zasilające reaktor.
2. Zastosowanie przegrzewu międzystopniowego oraz wymienników regeneracyjnych pozwoliło na uzyskanie wysokich wartości sprawności układu.
3. W przypadku układu gazowego z reaktorem HTGR zaobserwowano wzrost sprawności układu wraz ze wzrostem temperatury czynnika roboczego na wlocie z reaktora. Dla potrzeb optymalizacji przyjęto, że temperatura ta może wahać się od 1073 K do 1273 K w zależności od możliwości reaktora HTGR. W tym zakresie sprawność obiegu przyjmuje wartości od ok. 35,5% do ok. 41,7%.
4. Na sprawność układu gazowego wpływ miał rekuperator. Dzięki zastosowaniu rekuperacji ciepło spalin wylotowych zostało dodatkowo wykorzystane na podgrzanie czynnika roboczego na wlocie do reaktora, dzięki czemu potrzeba było mniej paliwa na zapewnienie wymaganych parametrów czynnika na wlocie do turbiny. Przekłada się to wymiennie na wzrost sprawności układu.
5. Porównując jądrowy obieg parowy o mocy 560 MW z układem gazowym o tej samej mocy łatwo zauważyć, że układ z turbiną parową ma znacznie wyższą sprawność niż układ z turbiną gazową. Sprawność netto elektrowni parowej waha się w granicach od 43,7% do 46,3%, natomiast dla elektrowni gazowej parametr ten wynosi od 35,5% do 41,7%.

Wysokotemperaturowe reaktory chłodzone gazem HTGR ze względu na szereg zalet mogą zostać z powodzeniem zastosowane w morskich elektrowniach jądrowych, zarówno w przypadku układów parowych jak i gazowych. Morskie jednostki wytwórcze mogą stać się idealnym rozwiązaniem dla obszarów, na których panują trudne warunki naturalne, przez co rozbudowa infrastruktury przesyłowej jest prawie niemożliwa, jak i dla miejsc takich jak wyspy, w przypadku których każda wolna powierzchnia terenu jest cenna. Układy nuklearne usytuowane na morzu mogą również być korzystne ze względu na bezpieczeństwo. W przeciwieństwie do elektrowni na lądzie morskie jednostki wytwórcze nie ulegną uszkodzeniu czy też zniszczeniu w przypadku takich katastrof naturalnych, jak trzęsienia ziemi, tsunami czy powódzie.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Nagatani K., Kiribayashi S., Okada Y. et al., *Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots*. "Journal of Field Robotics" 2013, Vol. 30, Issue 1, p. 44-63.

- [2] Hirose, K., 2011 *Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: Summary of regional radioactive deposition monitoring results*. "Journal of Environmental Radioactivity" 2012, p. 13-17.
- [3] Lee K., Lee K-H., Lee J., et al., *A new design concept for offshore nuclear power plants with enhanced safety features*. "Nuclear Engineering and Design" 2013, 254, p. 129-141.
- [4] Lee K-H., Kim M-G., Lee J-I., Lee P-S., *Recent Advances in Ocean Nuclear Power Plant*, "Energies" 2015, Vol. 8, s. 11470-11492.
- [5] Carlton J. S., Smarta R., Jenkins V., *The nuclear propulsion of merchant ships: Aspects of engineering, science and technology*. "Journal of Marine Engineering & Technology" 2011, s. 47-59.
- [6] Hirdaris S.E., Cheng Y.F., Shallcross P., Bonafoux et al., *Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion*. "Ocean Engineering" 2014, Vol. 79, s. 101-130.
- [7] Gorlinski Yu.E., Kut'kov V.A., Lystsov V.N. et al., *Securing the radiological safety of people and the environment at all stages of the life cycle of floating nuclear heat-and-power plants*. "Atomic Energy" 2009, Vol. 107, No. 2, s. 122-129.
- [8] Sarkisov A.A., Vysotskii V.L., Bilashenko V.P. et al., *Expected radiological and radioecological consequences of operating floating nuclear heat and power plants*. "Atomic Energy" 2008, Vol. 104, No. 3, s. 237-248.
- [9] Standing W.J.F., Dowdall M., Amundsen I., Strad P., *Floating nuclear power plants: Potential implications for radioactive pollution of the northern marine environment*. "Marine Pollution Bulletin" 2009, 58, s. 174-178.
- [10] Lepekhin A., Andreeva-Andrievskaya L., Kuznetsov V., *Status of Russian small and medium sized reactor activities. In Proceedings of the Meeting of the International Framework for Nuclear Energy Cooperation*, Rome, Italy, 6 December 2010.
- [11] Baek J-K., Mistarihi Q., Yeo S., et al., *A Preliminary Study for Diffusion Experiments of Metallic Fission Products in Graphite for HTGR*. Transaction of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Gyeongju, Korea, October 2015, s. 29-30.
- [12] Kowalczyk T., Gluch J., Ziolkowski P., *Analysis of possible application of high-temperature nuclear reactors to contemporary large-output steam power plants on ships*. "Polish Maritime Research" 2016, Vol. 23, No. 2 (90), s. 32-41.
- [13] Gardzilewicz A., Gluch J., Bogulicz M., Walkowiak R., Najwer M., Kiebdaj J., *Experience in Application of Thermal Diagnostics in the Turow Power Station*, W: (CD-ROM) ASME IJPGC'2003, IJPGC2003-40017.
- [14] Takamatsu K., Hu R., *New reactor cavity cooling system having passive safety features using novel shape for HTGRs and VHTRs*. "Annals of Nuclear Energy" 2015, 77, s. 165-171.
- [15] <https://www.tvp.info/25009844/chinczycy-zbuduja-flote-plywajacych-elektrowni-atomowych>
- [16] <https://wiadomosci.wp.pl/chiny-chca-zbudowac-plywajace-elektrownie-atomowe-maja-dostarczac-energie-na-morzu-poludniowochinskim-6027392788264065a>

