Seria: ENERGETYKA z. 108

Nr kol. 1040

Małgorzata HANUSZKIEWICZ Jan SKŁADZIEŃ Instytut Techniki Cieplnej

Politechniki Śląskiej

ANALIZA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW NA SPRAWNOŚĆ ELEKTROWNI ZASILANEJ PARĄ NASYCONĄ

<u>Streszczenie</u>. W pracy przedstawiono analizę wpływu charakterystycznych temperatur na sprawność elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym. Posłużono się układem 97 równań opisujących pracę poszczególnych elementów układu. Parametry wody i pary wodnej wyznaczono z równań stanu dostosowanych do możliwości techniki mikrokomputerowej. Przyjęto ogólnie stosowane uproszczenia, jak również założono, iż istnieje możliwość dobrania parametrów geometrycznych podgrzewaczy regeneracyjnych w celu uzyskania odpowiedniego efektu cieplnego.

Oznaczenia

с _р	– średnia pojemność cieplna właściwa, J/(kg•K),
h	– entalpia właściwa , J/kg,
តា	- strumień masy, kg/s,
Ν	- moc, W,
р	- ciśnienie, Pa,
8	– entropia właściwa, J/(kg₄K),
т	– temperatura bezwzględna, K,
v	- objętość właściwa, m ³ /kg,
x	– stopień suchości pary,
? elG	– sprawność generatora elektrycznego,
? <u>i</u>	- sprawność wewnętrzna,
2 _{mT}	- sprawność mechaniczna turbiny,
? tel, ? ^B tel	- sprawność energetyczna netto i brutto elektrowni,
2 mePS	- sprawność elektromechaniczna zespołu pompa-silnik,

Indeksy	
) _{WP}	– wysokoprężna część turbiny,
) _{NP1,}) _{NP}	 grupa stopni części niskoprężnej pracująca w obszarze pary nasyconej mokrej i pary przegrzanej,
) _{ic}	 k=1,2, numery poszczególnych punktów lub węzłów na schemacie układu cieplnego,
) _f ,) _g ,) _{fg} ,)	- dotyczy funkcji termodynamicznych, które określają od- powiednio parametry wody w stanie nasycenia, pary na- syconej suchej, pary nasyconej mokrej i wody,
) sk	 k=1,2,rozprężanie izentropowe w k-tym elemencie układu,
)',) [#]	- woda w punkcie pęcherzyków, para nasycona sucha.

1. Wstęp

Najbardziej popularnym typem reaktora jądrowego, z uwagi na bezpieczeństwo oraz koszt produkcji energii elektrycznej, jest reaktor termiczny wykorzystujący słabo wzbogacony uran. W reaktorze tym moderatorem i chłodziwam jest woda pod odpowiednim ciśnieniem. Zastosowanie jako chłodziwa reaktorowego sprężonej wody implikuje zasilanie turbiny parą nasyconą. Powoduje to obniżenie sprawności obiegu w stosunku do klasycznej elektrowni parowej, jak również wymagane jest wprowadzenie do układu dodatkowych urządzeń.

Celem niniejszej pracy jest analiza cieplna układu elektrowni parowej zasilanego parą nasyconą o parametrach typowych dla systemu z wodnym reaktorem ciśnieniowym. Przyjęto również typową strukturę dla bloku o dużej mocy. Analizę przeprowadzono posługując się równaniami bilansu substancji i energii oraz równaniami stanu dla ciekłej wody, pary wodnej nasyconej i pary przegrzanej. Przy formułowaniu równań bilansowych wykorzystano następujące założenia:

- struktura układu jest ściśle określona,
- układ znajduje się w stanie ustalonym,
- energia potencjalna i kinetyczna wody oraz pary wodnej w rurociągach jest znikoma,
- straty ciepła do otoczenia są pomijalnie małe,
- nie występuje dodatni lub ujemny przepływ substancji z otoczenia do wnętrza układu,
- w układzie nie występują przemiany chemiczne, woda zachowuje się zaś jak "czysta" substancja;

- w obiegu turbinowym nie uwzględnia się strat ciśnienia spowodowanych oporami przepływu,
- entalpia właściwa po przemianach przebiegających ze zmianą ciśnienia związana jest ze sprawnością wewnętrzną maszyn, w których przemiany te zachodzą, sprawności wewnętrzne traktowane są jako wielkości znane,

Dalsze założenia o charakterze szczegółowym podano w rozdz. 5.

Obliczenia zrealizowano ponadto dla warunków, gdy zadane są wartości ciśnienia w poszczególnych punktach układu, jak również gdy znane są charakterystyczne wartości temperatury. Obliczenia mają postać studialną i abstrahują od sposobu rozwiązania konstrukcyjnego elementów układu, a w szczególności wymienników ciepła. Jest to równoważne założeniu, że wymienniki te w każdym przypadku można dobrać tak, aby uzyskać założony efekt.

2. Opis rozpatrywanego układu

Strukturę układu cieplnego, który jest przedmiotem analizy, przedstawiono na rys. 1. W obiegu pierwotnym wyróżniono trzy elementy, tj. reaktor 1, wytwornicę pary 2 oraz główną pompę cyrkulacyjną 3. W obiegu tym krąży woda o ciśnieniu ok. 12,5 MPa, która przepływa przez rdzeń reaktora pobierając generujące się tam ciepło, przekazywane następnie w wytwornicach pary czynnikowi roboczemu obiegu wtórnego. Turbina zastosowana w obiegu wtórnym ma jedną dwustrumieniową część wysokoprężną 4, która pracuje w obszarze pary nasyconej oraz trzy dwustrumieniowe części niskoprężne 10. Para nasycona mokra z wysokoprężnej części turbiny kierowana jest do miedzystopniowego separatora wilgoci. Separator ma dwa stopnie: pierwszy stopień stanowi mechaniczny separator bezwładnościowy 7, drugi zaś stopień to separator termiczny wraz z przegrzewaczem 8 zasilany parą świeżę. Przegrzana para wyprowadzana jest do niskoprężnej części turbiny i po rozprężeniu trafia do skraplaczy 11. Niskoprężna część turbiny pracuje w obszarze pary przegrzanej (początkowe stopnie turbiny) oraz w obszarze pary nasyconej mokrej. Do podgrzewania wody zasilającej służy układ regeneracji ciepła złożony z czterech podgrzewaczy niskoprężnych 13, 14, 15, 19, odgazowywacza 22 oraz dwóch podgrzewaczy wysokoprężnych 24 i 25. Oprócz wymienionych elementów na rys. 1 zaznaczono generator prądu elektrycznego 9, pompy obiegu wtórnego 12, 16, 18, 21, 23, miejsca rozgałęzień strumieni 5, 6, 26 i ich połączeń 17, 20 oraz otoczenie 27 domykające układ pod względem energetycznym. Poszczególne elementy otoczono osłonami bilansowymi i założono, że wszelkie przemiany termodynamiczne zachodzę w obrębie utworzonych w ten sposób węzłów [7]. Na rys. 1 zaznaczono, łącznie z otoczeniem, 27 węzłów. Pomiędzy węzłami przez osłony bilansowe przekazywana jest energia. Przy matematycznym opisie pracy

105



układu uwzględniono strumienie zaznaczone na rys. 1, na którym znak minus oznacza strumień energii wypływający z bilansowanego elementu.

3. Równania opisujące pracę układu

Model matematyczny układu cieplnego rozpatrywanej elektrowni stanowią relacje wynikające z praw rządzących zjawiskami zachodzącymi w układzie. Sę to równania bilansu substancji i równania bilansu energii. Dołączono do nich zależności otrzymane z przyjętych definicji wskażników charakteryzujących pracę urządzeń. Do określenia wielkości termodynamicznych wody i pary wodnej posłużył zestaw formuł aproksymacyjnych podanych w [4, 5]. Formuły te umożliwiają dość dokładne obliczenie parametrów pary nasyconej, pary przegrzanej oraz wody za pomocą maszyny cyfrowej. Formuły aproksymacyjne mają na ogół następującą postać [4, 5]: woda, para przegrzana:

$$y(p,t) = \sum_{i=0}^{n} A_{i}tp^{i} ,$$

H₂O w stanie nasycenia:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{n} a_{i}t^{i}$$

lub

$$y(p) = \sum_{i=0}^{n} a_{i}(lnp)^{i},$$

gdzie:

У	-	wyznaczana funkcja termodynamiczna,
$A_i(t)$	-	współczynnik zależny od temperatury,
ai	-16	stałe współczynniki,
n	-	wskaźnik liczbowy.

Model matematyczny rozpatrywanego układu cieplnego stanowią równania o numerach od (1) do (97) zamieszczone w tabl. 1. Układ równań zapisano dla założeń przedstawionych w p. 1. Pierwszą grupę stanowią zależności pozwalające określić entalpię czynnika roboczego (H₂O) na podstawie znanych parametrów z wykorzystaniem formuł aproksymacyjnych [4]. Są to równania od (1) do (39) (tabl. 1). Za pomocą tych zależności można określić wartości entalpii właściwej czynnika we wszystkich punktach obiegu z wyjątkiem tych, które oznaczono numerami 2, 5, 25, 27, 48 (rys. 1); entalpie

(2)

(1)

(3)

Nr	Poetać równania
równania	
1	$h_{1} = h_{w}(p_{1},T_{1})$
ба	$T_8 = T_s(p_8); h_{s8} = h_{fg}(s_3, T_8); h_8 = h_7 - ?_{iWP}(h_7 - h_{s8})$
6b	$h' = h_{f}(p_{8}); h_{8}'' = h_{g}(p_{8}); x_{8} = (h_{8}-h_{8}')/(h_{8}''-h_{8}')$
6c	$s'_8 = s_f(p_8); s''_8 = s_g(p_8); s_8 = s'_8 + x_8(s''_8 - s'_8)$
15b	$s_{17} = s(h_{17}, p_{17})$
20	$v_{21} = v_f(p_{21}); h_{22} = h_{21} + (p_{22} - p_{21}) v_{21} / v_{149}$
39	$h_{47} = c_p(\tau_{47} - 273, 14)$
40	$T_2 = f[h_2, h_w(p_2, T_2)]; v_2 = v_w(p_2, T_2);$
	$h_5 = h_2^+ (p_5 - p_2) v_2 / v_{154}$
41	$m_5 - m_1 = 0$
42	^m ₄ - ^m ₃ ∞ ⁰
43	$m_1 - m_2 = 0$
72	m ₄₇ ^{- m} ₄₈ ^{≠ 0}
73	^m 5 ^h 5 ^{+ N} 55 ^{- m} 1 ^h 1 ^{≈ O}
74	$m_1h_1 + m_4h_4 - m_2h_2 - m_3h_3 = 0$
75	$m_2h_2 + N_{54} m_{ePS54} - m_5h_5 = 0$
95	$m_8h_8 + m_{33}h_{33} - m_4h_4 - m_{34}h_{34} = 0$
96	$\mathcal{Z}_{tel}^{B} = N_{56}/N_{55}$
97	$2_{tel}^{N} = (N_{56} - N_{49} - N_{50} - N_{51} - N_{52} - N_{53} - N_{54})/N_{55}$

Model matematyczny układu cieplnego

gdzie f – uwikłana postać temperatury T₂

właściwe h₂, h₂₅, h₂₇ oraz h₄₈ są wyznaczane z drugiej grupy zależności, tj. z równań bilansu substancji i energii, entalpia właściwa h_z zaś z zależności (40). Entalpię właściwą pary rozprężającej się w turbinie oraz wody za pompami obliczono korzystając z definicji sprawności wewnętrznej tych urządzeń. W tabl. 1 podano przykładowo sposób obliczania parametrów pary w turbinie, entalpii właściwej wody za pompą oraz entalpii czynnika w kilku wybranych punktach obiegu. W przypadku analizowanego układu cieplnego zapisano 32 równania bilansu substancji (równania od (41) do (72) w tabl. 1) oraz 23 równania bilansu energii (równania od (73) do (95) w tabl. 1). Równania bilansu substancji mają postać analogiczną do zależności (41) w tabl. 1. Utworzono je dla wszystkich węzłów, w których energia przekazywana jest za pomocę strugi czynnika, pomijajęc jedno z równań bilansu substancji dla pierwszego regeneracyjnego podgrzewacza niskoprężnego (węzeł 13) oraz bilans substancji dla węzła 3. Równania, które pominięto, nie mają charakteru niezależnego. W przypadku pozostałych przeponowych wymienników ciepła zapisano po dwa równania bilansu substancji. Bilanse energii sporządzono dla wszystkich elementów z pominięciem tych węzłow, w których struga czynnika się rozdziela (węzeł 5, 6, 26), Zależności (96) i (97) pozwalają obliczyć sprawność energetyczną brutto i netto elektrowni, gdyż pominięte bilanse nie dają równań niezależnych.

4. Metoda rozwiązywania zagadnienia

Przedstawiony w p. 3 układ zależności podzielono na trzy grupy. O wyodrębnieniu pierwszego zespołu równań zadecydowało to, że występujące w 🛁 nim równania można rozwiązać niezależnie od pozostałych; uzyskane wyniki traktowane są jako wielkości znane w równaniach pozostałych. Do pierwszej grupy należą głównie relacje określające entalpie właściwe czynnika w poszczególnych punktach obiegu na podstawie parametrów znanych. W pierwszym etapie uzyskano także wartości strumieni czynnika możliwe do określenia w sposób bezpośredni. Drugą grupę stanowią równania bilansu substancji i energii wzajemnie z sobą powiązane. Są one rozwięzywane metodą eliminacji Gaussa po usunięciu z nich nieliniowości poprzez dodawanie stronami odpowiednich równań. Nieliniowości w postaci iloczynów dwóch niewiadomych, tj. strumienia i entalpii właściwej czynnika, występują w równaniach bilansu energii dla węzłów 15 i 17 $(m_{25}h_{25})$ oraz 19 i 20 $(m_{27}h_{27})$. Po rozwiązaniu uzyskanego w ten sposób układu równań liniowych z bilansów energii dla tych węzłów obliczano usunięte wcześniej niewiadome. Trzecią grupe stanowią zależności, z których wyznacza się pozostałe poszukiwane wielkości, wykorzystując wyniki uzyskane w efekcie rozwiązania pierwszej i drugiej grupy równań. Wielkościami danymi są sprawności urządzeń, strumienie: pary wytwarzanej w wytwornicy,wody w obiegu pierwotnym i wody

chłodzącej skraplacz oraz parametry czynnika umożliwiające obliczenie entalpii właściwych. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości strumieni i entalpii właściwych czynnika w poszczególnych punktach obiegu. Obliczano także wytwarzaną moc elektryczną, elektryczne moce napędowe pomp, moc cieplną reaktora oraz sprawność energetyczną brutto i netto modelowanej elektrowni.

5. Wyniki obliczeń liczbowych

Przedstawiony w p. 3 model matematyczny elektrowni posłużył do przeprowadzenia wielowariantowych obliczeń liczbowych [2]. Założono, że strumień m₃ pary wytwarzanej w wytwornicy ma stałą wartość oraz że energia elektryczna zużywana jest w układzie wyłącznie przez silniki służące do napędu pomp. Przyjęto także, że skropliny opuszczające skraplacz i podgrzewacze regeneracyjne mają temperaturę nasycenia. Obliczenia przeprowadzono dla przykładowych danych korzystając m.in. z wartości, które podano w [1, 3, 6].

Podstawowy zestaw danych przedstawiono w tabl. 2. Zawiera on wartości parametrów w poszczególnych punktach obiegu (ciśnienie, temperaturę, stopień suchości pary), znane strumienie czynnika oraz sprawności urządzeń. Wyniki obliczeń zrealizowanych dla tych danych zamieszczono w tabl. 3. Są to wartości entalpii właściwej oraz strumieni czynnika w poszczególnych punktach obiegu, charakterystyczne moce oraz sprawności energetyczne analizowanej elektrowni. Obliczone wartości pozwoliży ocenić słuszność modelu matematycznego oraz przyjętych założeń, a także poprawność zaprogramowania wykorzystanych formuł aproksymacyjnych.

Dalsze rozważania, które przeprowadzono na podstawie zbudówanego układu równań, obejmuję kilka wariantów. W pierwszym z nich zmieniano ciśnienie odgazowania, zakładając stałę wartość temperatury w p. 4 oraz ilorazu przyrostów temperatury wody zasilającej w podgrzewaczach regeneracyjnych wysokoprężnych 24 i 25:

$$\frac{\Delta T_{24}}{\Delta T_{25}} = 1,28$$
,

gdzie:

 ΔT_{24} , ΔT_{25} - przyrosty temperatury wody w podgrzewaczach wysokociśnieniowych 24 i 25.

Pozostałe dane wykorzystane w obliczeniach przyjęto jak w tabl. 2. Obliczone dla różnych wartości ciśnienia odgazowania sprawności energetyczne elektrowni przedstawiono w tabl. 4. Uzyskane wyniki wskazuję, że wzrost ciśnienia w odgazowywaczu w zakresie od 0,7 do 1,1 MPa powoduje

111

Ciśnienia p,, MPa													
Nr P _i punktu		Nr punktu			Pi		Nr punktu		P ₁				
1		1	2.26	1	5		0.625		29		1	,67	
2		1	2,26	1	.6		4,35		30		1	,67	
3			4,35	17			0,236		31		0	0,70	
4			6,60	18			0,079		32		6,60		
5		1	2,50	1	.9		0,0278		33		6,60		
6			4,35	20			0,0048		34		2,77		
7			4,35	2	1		0,0048		35		1	,67	
8			2,77	2	2		2,65		36		2	,16	
9			1,67	2	3		2,65			37	0,079		
10			0,673	2	:4		2,65			38	0,0278		
11			0,673	2	:5		2,65	2,65		39	0,236		
12			0,673	26			2,65	,65		40	2,65		
13			0,625	27			2,65	55		41		,673	
14			0,625	28			2,65	2,65 4		42	2,65		
Temper	atur	y T _i	, К:				_		:				
Nr punktu	cu 1 4			14	23		24	26		28	33	47	
Ti	57	5,1	496,6	512,3	336,	9	362,0	2,0 394,3 426,1		426,1	469,7	290,1	
Strumienie masy m_1 , kg/s: $m_1 = 8070,00; m_3 = 750,73; m_{47} = 24,000.$													
Stopnie suchości: x ₃ = 0,998; x ₁₃ = 0,995 Średnia pojemność cieplna właściwa woda: c _p = 4,20 kJ/(kg·K)													
Sprawności urzędzeń:													
$?_{mT} = 0,995; ?_{elG} = 0,98; ?_{iWP} = 0,823; ?_{iNP} = 0,844$													
$2_{iNP1} = 0,80; 2_{i52} = 0,80; 2_{ik} = 0,75 dla k = 49,50,51,53,54$													
7 _{mePSk} = 0,85 dla k = 49,50,51,52,53,54.													

Zestaw danych

Nr punktu	Strumień substancji, kg/s	Entalpia właściwa, kJ/kg	Nr punktu	Strum: substa kg/s	ień ancji,	Entalpia właściwa, kJ/kg	
1	8070,00	1346,50	23	466,	76	269,18	
2	8070,00 1175,60 24 466,7		76	374,31			
3	750,81	2798,08	25	466,	76	509,52	
4	750,81	960,97	26	494,9	97	510,53	
5	8070,00	1176,01	27	494,9	97	643,22	
6	54,48	2798,08	28	531,:	15	646,42	
7	696,33	2798,08	29	1,:	14	2639,78	
8	52,67	2721,83	30	45,7	74	2639,78	
9	46,88	2639,78	31	750,8	31	697,04	
10	596,78	2505,65	32	750,8	31	705,21	
11	36,18	2505,65	33	750,8	B1	839,30	
12	560,60	2505,65	34	52,6	57	987,65	
13	494,97	2748,04	35	152,8	89	867,86	
14	494,97	2933,61	36	152,8	89	868,60	
15	65,63	677,36	37	22,	12	390,24	
16	54,48	1112,00	38	48,8	85	282,00	
17	28,21	2764,06	39	28,	21	527,28	
18	22,12	2608,31	40	28,21		530,71	
19	26,73	2478,94	41	36,18		690,15	
20	417,91	2290,08	42	36,18		693,06	
21	466,76	134,72	47	24000,00		71,40	
22	466,76	138,26	46	24000,00		109,23	
Charakterystyczne moce							
Nr punktu	Nr Hoc, punktu MW			Nr punktu		Moc, MW	
44	184.1	184 832			7,2174		
45	476.4	53			0,1365		
49	1.	0463	54			3,9005	
50	0.:	55			75,86		
51	0,:	56 4			66,946		
Sprawności energetyczne elektrowni							
brutto		····			0,339	4	
netto					0,329	6	

Entalpie właściwe i strumienie substancji

4

Lp.	Ciśnienie w odgazowywaczu	Sprawność energetyczna elektrowni				
	P ₃₁ , ^{MPa}	brutto 7 ⁶ 7 tel	netto ? ^N tel			
1	0,70	0,3394	0,3296			
2	0,80	0,3397	0,3300			
3	0,90	0,3398	0,3301			
4	1,00	0,3402	0,3307			
5	1,10	0,3399	0,3304			

Wpływ ciśnienia odgazowania na sprawność elektrowni

niewielkie zmiany sprawności energetycznych brutto i netto elektrowni. Słabo dostrzegalne maksimum tych sprawności występuje przy ciśnieniu 1.0 NPa, Z termodynamicznego punktu widzenia korzystniejsze byłoby więc zwiększenie ciśnienia odgazowania powyżej wartości przyjętej w rozpatrywanym układzie (0,7 MPa). Nalczy jednak wziąć pod uwagę, że odgazowywacz, pompa zasilająca i zbiornik wody zasilającej pracują w wysokiej temperaturze mniej niezawodnie niż w temperaturze niższej. Zmiana ciśnienia odgazowania wpływa także na układ regeneracji wysokoprężnej; zwiększenie ciśnienia a tym samym temperatury w odgazowywaczu, przy założonej stałej temperaturze wody zasilającej wytwornicę pary, powoduje zmniejszenie przyrostu temperatury wody w wysokoprężnych podgrzewaczach regeneracyjnych. Różnica temperatury wody zasilającej dopływającej do wytwornicy pary i temperatury wody opuszczającej zbiornik wody zasilającej zmniejsza się od wartości 58,5 K dla ciśnienia odgazowania wynoszącego 0,7 MPa do wartości równej 39,4 K dla ciśnienia 1,1 MPa. Sybór ciśnienia odgazowania wpływa więc na warunki eksploatacji układu. Przy wyższym ciśnienių w odgazowywaczų może ponadto zaistnieć potrzeba zainstalowania dodatkowej pompy sprężającej strumień wody 15.

W powyższych rozważaniach, mających charakter wyłącznie termodynamiczny, pominięto fakt wpływu ciśnienia odgazowania wody na przebieg tego procesu. W drugiej serii obliczeń zmieniano temperaturę wody za podgrzewaczami niskociśnieniowymi. Założono przy tym niezmienne wartości temperatury wody podgrzewanej w wysokociśnieniowym układzie regeneracji ciepła oraz stałe stosunki przyrostów temperatury w podgrzewaczach 13, 14, 15 do przyrostu temperatury w podgrzewaczu 19:

 $\frac{\Delta T_{13}}{\Delta T_{19}} = 0,995, \quad \frac{\Delta T_{14}}{\Delta T_{19}} = 0,789, \quad \frac{\Delta T_{15}}{\Delta T_{19}} = 1,016 \ ,$

gdzie:

 ΔT_{13} , ΔT_{14} , ΔT_{15} , ΔT_{19} - przyrosty temperatury czynnika w podgrzewaczach niskoprężnych 13, 14, 15 i 19.

Pozostałe wielkości wejściowe, w tym ciśnienie w upustach, przyjęto jak w podstawowym zestawie danych. Zmianę sprawności elektrowni w funkcji temperatury wody za podgrzewaczami niskociśnieniowymi wyznaczonę na podstawie opracowanego modelu przedstawia rys. 2.





W trzeciej serii obliczenia przeprowadzono dla różnych wartości temperatury wody zasilającej wytwornicę pary, zakładając stały stosunek przyrostów temperatury w podgrzewaczu wysokoprężnym 24 i 25. Uzyskane wartości sprawności przedstawiono na rys. 3. Również trzecią wersję obliczeń zrealizowano przyjmując pozostałe dane jak w tabl. 2. Wykresy zależności sprawności elektrowni od temperatury wody opuszczającej niskociśnieniowy układ regeneracji (rys. 2) oraz od temperatury wody dostarczanej do wytwornicy (rys. 3) mają w rozpatrywanym przedziale temperatury przebieg zbliżony do liniowego. Wynika stąd, że korzystne jest zwiększanie temperatury podgrzewanej wody jeśli nie wykluczają tego istniejące ograniczenia (np. wartość ciśnienia odgazowania oraz ciśnienia pary produkowanej w wytwornicy).

Ostatnie dwa warianty dotyczą wysokociśnieniowego układu regeneracji ciepła; zmieniano przyrosty temperatury w poszczególnych podgrzewaczach wysokoprężnych, zakładając różne wartości temperatury wody T_{zz} za pier-

114



Rys. 3. Zależność sprawności elektrowni od temperatury wody za podgrzewaczami regeneracyjnymi wysokociśnieniowymi

Fig. 3. Dependence of the power plant efficiency on temperature of water after the high-pressure regenerative heaters



Rys. 4. Zależność sprawności elektrowni od temperatury wody za pierwszym podgrzewaczem regeneracyjnym wysokociśnieniowym dla stałego ciśnienia pary zasilającej ten podgrzewacz

Fig. 4. Dependence of the power plant efficiency on temperature of water after first high-pressure regenerative heater for constant pressure of the vapour feeding the heater



Rys. 5. Zależność sprawności elektrowni od temperatury wody za pierwszym podgrzewaczem regeneracyjnym wysokociśnieniowym dla stałej różnicy temperatury $\Delta T = T_{30} - T_{33}$

Fig. 5. Dependence of the power plant efficiency on temperature of water after the first high-pressure regenerative heater for the constant temperature difference $\Delta T = T_{30} - T_{33}$

wszym wymiennikiem. Rozpatrywano dwa przypadki. W pierwszym przyjęto wszystkie pozostałe wielkości jako dane niezmienne i jak w zestawie podstawowym. W drugim przypadku zmieniano także parametry pary zasilającej podgrzewacz wysokoprężny 24, zakładając stałą minimalną różnicę temperatury pary i podgrzewanej wody ΔT = 6,82 K. Wykresy zależności sprawności modelowanej elektrowni w funkcji temperatury wody Tzz przedstawiają rysunki 4 i 5. W pierwszym przypadku temperaturę Tzz zmieniano w przedziale, którego granice determinują parametry upustowej pary zasilającej 9 i wody 32 dostarczonej do podgrzewacza (449,6+469,6 K). W tym zakresie związek między sprawnością a temperaturą wody za pierwezym podgrzewaczem wysokoprężnym ma charakter zbliżony do liniowego (rys. 4). Wyniki obliczeń przeprowadzonych w przypadku zachowania stałej minimalnej różnicy temperatury czynników w wymienniku 24 (rys, 5) wskazują, że istnieje zakres temperatury podgrzania wody T_{x3}, w którym sprawność elektrowni osiąga maksimum (471,6+474,6 K). Należy jednak, wziąć pod uwagę to, że maksymalna wartość zależnych od temperatury T₃₃ parametrów kondensatu odprowadzanego z pierwszego podgrzewacza wysokoprężnego określona jest przez ciśnienie odgazowania. Na rys. 5 linią przerywaną zaznaczono części wykresu dla tego przedziału temperatury T_{zz} wody, który wymagałby zmiany warunków odgazowania. W zakresie od 454,6 do 469,6 K zależność sprawności rozpatrywanej elektrowni w funkcji temperatury wody za pierwszym podgrzewaczem wysokoprężnym jest zbliżona do liniowej.

6. Wnioski i uwagi końcowe

W pracy przedstawiono model matematyczny elektrowni zasilanej parę nasyconę stworzony dla przedstawionych na wstępie założeń. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że w zakresie ciśnienia w odgazowywaczu 0,7†1,1 MPa wartości sprawności modelowanej elektrowni są zbliżone; słabo dostrzegalne maksimum występuje przy ciśnieniu 1,0 MPa. Wykresy zależności sprawności w funkcji temperatury wody za podgrzewaczami niskoprężnymi (rys. 2) a także w zależności od temperatury za podgrzewaczem wysokoprężnym 25 (rys. 3) wskazuję, że zwiększenie temperatury podgrzania wody jest korzystne. Podobny efekt daje zwiększenie przyrostu temperatury czynnike w I stopniu wysokociśnieniowego układu regeneracji cieoła (rys. 4), przy stałych pozostałych paranetrach pracy układu. Z wykresu przedstawionego na rys. 5 wynika optymalna, z termodynamicznego punktu widzenia, temperatura wody podgrzanej w podgrzewaczu wysokoprężnym 24 przy założeniu minimalnej różnicy temperatury czynników w wymienniku.

LITERATURA

- [1] Chmielniak T.: Zagadnienia cieplnych maszyn przepływowych. Teoria stopnia. Turbiny wielostopniowe. Pol. Śl., Gliwice 1980.
- [2] Hanuszkiewicz M.: Analiza cieplna układu siłowni jądrowej z reaktorem WWER-440. Praca magisterska wykonana w ITC Pol. Śl., Gliwice 1986.
- [3] Kowalski A.: Elektrownie jądrowe 1980. Dane projektowe i eksploatacyjne. Bloki energetyczne z reaktorami wodnymi ciśnieniowymi. Tom II. Post. Techn. Jądr., Warszawa 1981.
- [4] Matla R.: Formuly aproksymacyjne do obliczeń technicznych wielkości termodynamicznych wody i pary wodnej przy zastosowaniu ETO. I i II. Gosp. Pal. i En. 8-9, 10, 1973, 9-12, 11-16.
- [5] Matla R.: Optymalizacja obliczeń wielkości termodynamicznych czynnika roboczego w elektrowniach cieplnych. Prace Nauk. Elektryka 25, Pol. Warszawska, Warszawa 1973.
- [6] Miller A.: Turbiny elektrowni jądrowych. Pol. Warszawska, Warszawa 1981.
- [7] Portacha J.: Identyfikacja układów cieplnych siłowni klasycznych i jądrowych w stanie ustalonym. Prace Nauk. Mechanika 44, Pol. Warszawska, Warszawa 1977.

Recenzent: doc. dr inż. Antoni Guzik

Wpłynęło do redakcji w marcu 1989 r.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗБРАННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА КОЭФФИЦЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЦИКЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПИТАЕМОЙ НАСЫЩЕННЫМ ПАРСМ

Резюме

В работе представлен анализ влияния избранных характеристических температур на козффицент полезного действия цикла атомной энергетической станции с водно-водяным реактором. Воспользовались системой девяносто семи уравнений, определяющих работу отдельных элементов энергетической установки. Параметры воды и водяного пара установили из уравнений состаяния, которые приспособлены к микрокомпютерной технике. Принято обще применяемые упрощения, положено, что возможно подобрать геометрические параметры регенеративных подогревателей так, чтобы получить соотвествующий тепловой эффект.

ANALYSIS OF SELECTED PARAMETERS INFLUENCE ON THERMAL EFFICIENCY OF THE POWER PLANT SUPPLIED WITH SATURATED VAPOUR

Summary

In the paper an analysis of the influence of some characteristic temperatures on thermal efficiency of the cycle of the power plant with nuclear PWR type reactor has been given. A system of 97 equations describing the operation of particular elements has been used. The parameters of water and steam have been determined from equations of state suitable for microcomputer technique. Generally used simplifications have been accepted. It has been also assumed that it is possible to assort regenerative heater geometrical parameters in order to achieve suitable thermal effect.