

PAWEŁ ZIÓLKOWSKI^{1*}
DARIUSZ MIKIELEWICZ²

¹ Instytut Maszyn Przepływowych PAN
Zakład Konwersji Energii
Gdańsk

² Politechnika Gdańska
Katedra Energetyki i Aparatury Przemysłowej

Analiza pracy bloku nadkrytycznego 900 MWe współpracującego z obiegiem ORC

W pracy przedstawiono analizę termodynamiczną bloku nadkrytycznego o mocy 900 MWe współpracującego z obiegiem ORC (organic Rankine cycle). Wykonano symulacje numeryczne pracy siłowni dla warunków nominalnych określając jej moc i sprawność elektryczną. Ponadto przeanalizowano pracę bloku współpracującego z obiegiem ORC dla czterech czynników roboczych, tj.: propan, izobutan, pentan i etanol. W układzie ORC górne źródła ciepła stanowi woda z systemu odzysku ciepła o temperaturze 90 °C wspomagana ciepłem z upustu pary z turbiny parowej. Analizę wykonano za pomocą kodów numerycznych typu CFM.

1 Wstęp

Zarówno w światowej jak i polskiej energetyce obserwuje się trendy do wytwarzania energii elektrycznej z jak najwyższą sprawnością przy jednoczesnym minimalnym obciążeniu środowiska naturalnego. Zakres możliwej degradacji ekosystemu przez polską energetykę określa Dyrektywa Unii Europejskiej nr 2010/75/UE [14]. Aby zrealizować jej wymogi konieczne jest wprowadzanie wysokosprawnych elektrowni takich jak na przykład nowy blok na parametry nadkrytyczne w Elektrowni Bełchatów. Obieg cieplny niniejszego bloku energetycznego 858 MWe charakteryzuje się wysoką sprawnością konwersji energii pierwotnej paliw węglowych na energię użyteczną, a sprawność wytwarzania energii elektrycznej netto wynosi ponad 42% [16]. Rozwijane równolegle technologie CCS (ang. *carbon capture and storage*) mają w przyszłości dodatkowo ograniczyć emisję dwutlenku węgla

*E-mail: pziolkowski@imp.gda.pl

w obecnie pracujących i budowanych blokach węglowych [4]. Zatem nowo budowane bloki nadkrytyczne dużych mocy mogą rozwiązać takie problemy jak dostawy odpowiedniej ilości energii elektrycznej oraz spełnienie surowych norm dotyczących ciągłego obniżania limitów dwutlenku węgla emitowanego do atmosfery [17].

Mimo niewątpliwych zalet bloków nadkrytycznych konieczne jest ciągle poszukiwanie nowych sposobów podnoszenia sprawności. Możliwe jest to poprzez podnoszenie parametrów pary, wykorzystywanie ciepła odpadowego, modyfikację układów, oraz zastępowanie części niskosprawnych układu nowymi o wyższej sprawności [1,2,13]. Rozwojowi bloków nadkrytycznych towarzyszył postęp w dziedzinie projektowania elementów oraz konfigurowania całych urządzeń i układów technologicznych; optymalizacji ulegała geometria elementów przepływowych, wprowadzano nowe technologie odlewania i odkuwania elementów ciśnieniowych oraz dodatkowo wytrzymałsze gatunki stali [1,11]. Zabiegi te pozwoliły między innymi na podnoszenie parametrów termodynamicznych pary wodnej i zmniejszanie strat obiegu, co ostatecznie przełożyło się na wzrost sprawności bloków w skali 7–8 p.p. [11].

Perspektywicznym rozwiązaniem podnoszenia sprawności jest wykorzystanie czynnika niskowrzącego w instalacji współpracującej z blokiem nadkrytycznym. Dzięki współpracy obiegu ORC z blokiem nadkrytycznym istnieje możliwość wykorzystania ciepła odpadowego spalin. Na uwagę zasługuje również zastosowanie turbiny binarnej – dwuczynnikowej realizującego w części wysokoprężnej i średnioprężnej tradycyjny obieg turbiny parowej, a w niskoprężnej obieg ORC (organic Rankine cycle). Przekazanie ciepła odbywało by się w wymienniku będącym jednocześnie skraplaczem pary wodnej oraz generatorem pary czynnika niskowrzącego. Na skutek małych objętości właściwych pary czynnika niskowrzącego w porównaniu do pary wodnej można by było zastąpić dużą i kosztowną część niskoprężną turbiny parowej małą turbiną pracującą w obiegu ORC. Po wprowadzeniu czynnika niskowrzącego jako płynu roboczego w części niskotemperaturowej turbiny można by było przede wszystkim znacząco zmniejszyć natężenie przepływu w części niskoprężnej, a co za tym idzie zmniejszyć powierzchnię wylotową turbiny i koszty inwestycji. Dalszymi zaletami jest mniejsza materiałochłonność i praco-chłonność oraz ograniczenie erozyjnego działania czynnika roboczego na układ łopatkowy [8,12].

Należy również wspomnieć o kluczowym problemie, który się pojawiają przy stosowaniu czynników niskowrzących. Jest to problem generacji pary. Generator pary powinien zapewniać zachowanie określonej zawartości fazy parowej w przepływie, gdyż prowadzenie wrzenia do całkowitego odparowania czynnika powo-

duże zmniejszenie średniego współczynnika wymiany ciepła [6,9]. Ze względu na istnienie w przepływie pary mokrej wymagane jest zainstalowanie separatora oddzielającego fazę parową od fazy ciekłej. Po rozdzieleniu faz czynnika ciecz kierowana jest ponownie do rekuperatora-parownika, a para czynnika niskowrzącego trafia do turbiny, gdzie wykonuje pracę obiegu ORC [9]. Utrzymanie stabilnych warunków wrzenia wiąże się nie tylko z doprowadzeniem odpowiedniego strumienia ciepła, ale również wymaga zachowania stałego rozkładu ciśnienia, bez wahań i pulsacji [6,10].

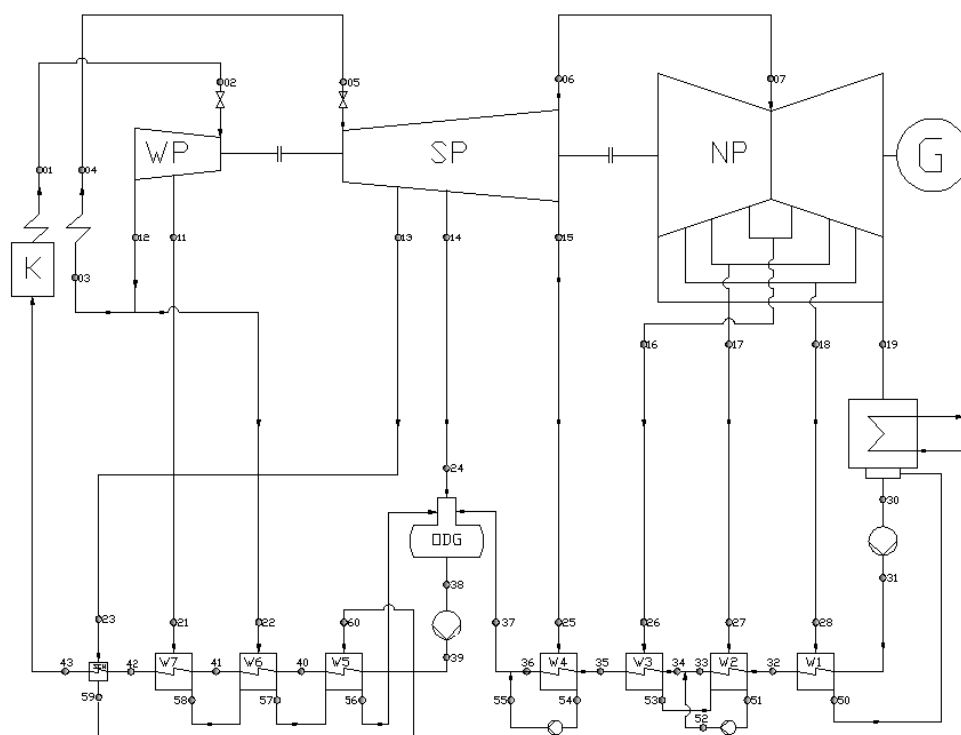
Celem niniejszej pracy jest analiza parametrów eksploatacyjnych i termodynamicznych obiegu nadkrytycznego 900 MWe, za pomocą dostępnych kodów numerycznych typu *CFM* (*Computational Flow Mechanics*), zarówno w pierwotnej konfiguracji, jak i po modernizacji. Narzędzia typu CFM bazują na integralnych (algebraicznych w przestrzeni) równaniach bilansu masy, pędu i energii [1,2]. Modernizacja bloku ma na celu podniesienie mocy i sprawności poprzez wykorzystanie ciepła odpadowego w obiegu ORC. Analiza numeryczna obiegu nadkrytycznego 900 MWe współpracującego z układem ORC ma na celu ustalenie maksymalnej mocy elektrycznej i sprawności bloku dla czterech czynników roboczych, tj. propan, izobutan, pentan i etanol.

2 Model numeryczny obiegu nadkrytycznego

Analizie numerycznej poddano obieg nadkrytyczny 900 MWe o parametrach pary świeżej 30,3 MPa/653 °C oraz pary wtórnej 6 MPa/672 °C. Schemat bloku wraz z oznaczonymi urządzeniami (K, WP, SP, NP, W1-W7, SCH, G) przedstawiono na rys. 1.

W bloku nadkrytycznym elektrowni pracują następujące urządzenia podstawowe: turbina upustowo-kondensacyjna wraz z generatorem o mocy elektrycznej 900 MWe oraz kocioł parowy opalany węglem o strumieniu masowym czynnika 2200 t/h. W układzie elektrowni znajduje się również szereg pozostałych urządzeń oznaczonych na schemacie.

Obliczenia obiegu cieplnego bloku nadkrytycznego wykonano dla jego nominalnych warunków pracy za pomocą programu Aspen Plus [3]. Obieg cieplny odwzorowano i zamodelowano w kodzie numerycznym na podstawie informacji przedstawionych na rys. 1. Modele matematyczne poszczególnych urządzeń wraz z definicjami mocy i sprawności dostępne są w pracy [3]. Parametry obiegu przyjęto na podstawie danych literaturowych z pracy [15], część danych zamieszczono w tab. 1. W pracy nie modelowano procesów spalania zachodzących w kotle, dlatego wprowadzono dodatkowy wskaźnik: sprawność odniesienia η_{od} zdefiniowana,



Rysunek 1. Schemat cieplny bloku nadkrytycznego, gdzie: K – kocioł, WP, SP, NP – część wysoko-, średnio- i niskoprężna turbiny parowej, SCH – schładzacz, ODG – odgazywacz, W1–W4 – wymienniki regeneracyjne niskoprężne, W5–W7 – wymienniki regeneracyjne wysokoprężne, G – generator [15]

jako iloraz mocy elektrycznej bloku brutto (N_{elB}) i strumienia energii cieplnej (\dot{Q}_d) przekazanej na wytworzenie pary przez kocioł:

$$\eta_{od} = \frac{N_{elB}}{\dot{Q}_d}.$$

W tab. 1. porównano wyniki obliczeń parametrów eksploatacyjnych obiegu cieplnego z danymi zamieszczonymi w dostępnej literaturze. Analizując wyniki obliczeń uzyskane za pomocą kodu Aspen Plus można stwierdzić, że kod ten umożliwia wiarygodną analizę pracy obiegów cieplnych. Różnice pojawiające się dla poszczególnych parametrów są niewielkie i wynikają z przyjętych uproszczeń[†].

[†]Przyjęto, że dostarczany strumień energii cieplnej jest wystarczający do osiągnięcia wymaganych nominalnych parametrów pary.

Tabela 1. Porównanie modelu z danymi z literatury [15]

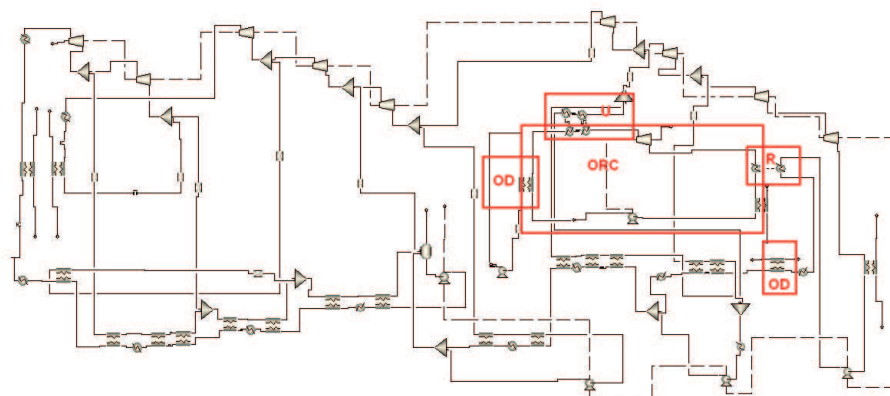
Parametr	Symbol	Dane lit.	Wg. modelu	Jednostka
Sprawność obiegu	η_{eB}	50,92	50,91	%
Moc elektryczna brutto (na zaciskach generatora)	N_{elB}	900,00	899,49	MW
Sprawność odniesienia	η_{od}	51,96	51,96	%
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej brutto (dla węgla kamiennego)	η_{elB}	49,10	49,07 *	%
Moc elektryczna netto (wskaźnik potrzeb własnych: 0.075)	N_{elN}	832,50	832,03	MW
Temperatura pary świeżej na wyjściu z kotła	t_{01}	653	653	°C
Ciśnienie pary świeżej na wyjściu z kotła	p_{01}	30,3	30,3	MPa
Temperatura pary świeżej przed turbiną	t_{02}	650	650	°C
Ciśnienie pary świeżej przed turbiną	p_{02}	30	30	MPa
Temperatura pary wtórnie przegrzanej na wyjściu z kotła	t_{04}	672	672	°C
Ciśnienie pary wtórnie przegrzanej na wyjściu z kotła	p_{04}	6	6	MPa
Temperatura pary wtórnie przegrzanej przed turbiną	t_{05}	670	670	°C
Ciśnienie w odgazowywaczu	p_{24}	1,15	1,15	MPa
Ciśnienie w skraplaczu	p_{19}	0,005	0,005	MPa
Ciśnienie za pompą skroplin	p_{31}	2,2	2,2	MPa
Temperatura wody zasilającej	t_{43}	310	310	°C
Sprawność wewnętrzna grup stopni części WP turbiny	η_{iWP}	90	90	%
Sprawność wewnętrzna grup stopni części SP turbiny	η_{iSP}	92	92	%
Sprawność wewnętrzna grup stopni części NP turbiny	η_{iNP}	85	85	%
Sprawność wewnętrzna ostatniej grupy stopni części NP turbiny	η_{iNP1}	80	80	%
Sprawność energetyczna kotła (węgiel kamienny)	η_k	94,5	94,4	%
Sprawność generatora	η_g	98,8	98,8	%
Straty mechaniczne turbiny	Δ_m	0,9	0,9	MW
Sprawność wewnętrzna pomp	η_{ip}	85	85	%
Sprawność wymienników regeneracyjnych	η_w	99,5	99,5-99,6	%
Sprawność schładzacza pary	η_{sch}	99,5	99,4	%
Sprawność odgazowywacza	$\eta_{odg+zwz}$	100	100	%
Straty przepływu w rurociągach pary do wymienników regeneracyjnych oraz schładzacza	ζ	2	2	%
Strata przepływu w rurociągu pary od schładzacza do wymiennika regeneracyjnego W5	ζ_{59-60}	1	1	%
Straty przepływu wody zasilającej przez wymienniki regeneracyjne i schładzacz	Δ_{str}	1	1	%
Strata ciśnienia czynnika obiegowego w kotle	Δ_{43-01}	4,2	4,2	MPa
Strata ciśnienia pary w przegrzewaczu wtórnym	Δ_{03-04}	0,3	0,3	MPa
Straty przepływu w rurociągach pary przegrzanej	ζ_{12-03}	1,7	1,7	%
	ζ_{04-05}	1,7	1,7	%
Straty przepływu między częścią SP a NP turbiny	ζ_{06-07}	1	1	%

* Określono na podstawie mocy elektrycznej brutto i strumienia energii chemicznej, który odpowiada iloczynowi strumienia masy paliwa i wartości opałowej.

Moc elektryczną brutto i sprawność elektryczną brutto oszacowano na poziomie 899,49 MW i 49,07%.

3 Model numeryczny bloku współpracującego z obiegiem ORC

Przy doborze czynnika roboczego kierowano się tym, aby charakteryzował się niską temperaturą wrzenia. Z tego względu najbardziej odpowiednimi czynnikami są węglowodory i węglodotlenki, a także ich mieszaniny. Związki które mogą być wykorzystane w obiegach ORC to: metan, etan, propan, butan, izobutan, n-pentan, izopentan, n-heksan, etylen, propylen, n-heptan, n-oktan, etanol, dwutlenek węgla, siarkowodór, azot, amoniak, a także wiele innych czynników stosowanych w chłodnictwie np. freony [5,7].



Rysunek 2. Ogólny schemat układu cieplnego bloku nadkrytycznego, w programie Aspen Plus, współpracującego z obiegiem czynnika niskowrzącego – ORC, regeneracją skroplin przy użyciu czynnika niskowrzącego – R, i wody o temperaturze 90 °C – OD oraz z wykorzystaniem pary z upustu części niskoprężnej – U

Przy tworzeniu modelu numerycznego współpracy bloku 900 MWe z obiegiem ORC założono, że do dyspozycji jest strumień ciepłej wody o mocy 200 MWt i temperaturze 90 °C. Woda uzyskuje powyższą temperaturę w systemie odzysku ciepła ze spalin i może być skierowana zarówno do podgrzewu czynnika krążącego w obiegu ORC, jak i do regeneracji ciepła w wymiennikach niskoprężnych. Dodatkowym założeniem było wykorzystanie części ciepła ze skraplającego się czynnika do podgrzewu kondensatu pary wodnej w pierwszym wymienniku niskoprężnym [18]. Oznacza to, że w układzie ORC górne źródła ciepła oprócz wody z

systemu odzysku ciepła o temperaturze 90°C wykorzystują ciepło z upustu pary z turbiny parowej. W rozpatrywanym przypadku założono, że para posiada temperaturę 227°C i ciśnienie $2,469 \times 10^5$ Pa oraz skrapla się w temperaturze 127°C . Umożliwi to osiągnięcie temperatury czynnika roboczego ORC przed turbiną na poziomie 122°C . W obliczeniach obiegu ORC przyjęto również, że sprawność turbiny i pompy wynoszą odpowiednio 0,9 i 0,85 oraz założono, że różnica temperatury w wymienniku między czynnikiem niskowrzącym a wodą/parą oddającą/pobierającą ciepło wynosi $\Delta = 5$ K. Ponadto założono, że wrzenie czynnika ORC będzie przebiegać w parametrach podkrytycznych. Założone temperatury wrzenia t_{CR} i wynikające z nich wartości ciśnienia p_{CR} zamieszczono w tab. 2. W przypadku skraplacz ORC przyjęto, że zachodzi w nim skraplanie czynnika niskowrzącego przy tej samej temperaturze, co w obiegu nadkrytycznym, to jest w $32,8^{\circ}\text{C}$. Dodatkowo założono, że woda podgrzana w systemie odzysku ciepła ze spalin do temperatury 90°C przekazuje ciepło do podgrzewu czynnika ORC i regeneracji niskoprężnej oraz przy tym ochładza się do temperatury 50°C .

4 Wyniki

Przeanalizowano następujące czynniki: propan, izobutan, pentan i etylen. Porównanie obiegów ORC dla poszczególnych czynników przedstawiono w tab. 2. Najwyższą sprawność w założonych warunkach podkrytycznych uzyskuje etanol i wynosi ona $\eta_{tCR} = 17,76\%$.

Tabela 2. Porównanie parametrów obiegu ORC

Parametr	Jednostka	Wartość parametru			
		Propan	Izobutan	Pentan	Etanol
p_{CR}	Pa	$36,00 \times 10^5$	$22,50 \times 10^5$	$9,46 \times 10^5$	$4,59 \times 10^5$
t_{CR}	$^{\circ}\text{C}$	87,3	106,4	122,0	122,0
p_{skr}	Pa	$11,6 \times 10^5$	$4,47 \times 10^5$	$0,9 \times 10^5$	$0,13 \times 10^5$
x	–	0,926	1,000	1,000	0,934
l_{tCR}	kJ/kg	30,69	53,60	79,19	187,34
q_{dCR}	kJ/kg	304,77	404,05	503,50	1054,64
η_{tCR}	%	10,07	13,27	15,73	17,76

Wyniki obliczeń wpływu układu ORC wraz z systemem regeneracji w wymiennikach niskoprężnych na blok nadkrytyczny przedstawiono w tab. 3. Strumień masy pary pobieranej z upustu na potrzeby obiegu ORC wyniósł $\dot{m}^{upust} = 23$ kg/s.

Najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla propanu, który zapewnia najwyższy przyrost sprawności i mocy całego bloku. Należy zwrócić uwagę, że obieg z propanem jako czynnikiem roboczym pobiera największy sumaryczny strumień ciepła (\dot{Q}_{ORC}) do podgrzewu i do odparowania czynnika niskowrzącego spośród analizowanych obiegów ORC. Należy również dodać, że propan pobiera największy strumień ciepła (\dot{Q}_w^{90}) z wody podgrzanej do 90 °C z systemu skraplania spalin. Do wszystkich czynników dociera ten sam strumień ciepła z pary upustowej $\dot{Q}_{ORCP} = 55,1$ MWt oraz kondensat pary wodnej dla wszystkich konfiguracji pobiera ten sam strumień ciepła z regeneracji $\dot{Q}_{reg} = \dot{Q}_{regw} + \dot{Q}_{regORC} = 89,4$ MWt. Zatem zasadnicze znaczenie dla pracy całego bloku ma strumień ciepła (\dot{Q}_{ORCw}), który może pobrać czynnik przy podgrzewie wodą.

Tabela 3. Wybrane wyniki obliczeń wpływu obiegu ORC na obieg nadkrytyczny

Parametr	Jednostka	Wartość parametru dla upustu $\dot{m}^{upust} = 23$ kg/s			
		Propan	Izobutan	Pentan	Etanol
Czynnik					
\dot{m}_{CR}	kg/s	395,0	208,2	146,4	62,1
N_{tCR}	MW	12,12	11,16	11,59	11,63
N_{elBO}	MWe	916,00	915,05	915,48	915,52
Δ_{elBO}	MWe	16,51	15,56	15,99	16,03
\dot{Q}_d	MWt	1749,2	1749,2	1749,2	1749,2
t_{kot}	°C	303,93	303,93	303,93	303,93
η_{od}	%	52,366	52,312	52,337	52,339
$\Delta\eta_{od}$	%	0,406	0,352	0,377	0,379
$\dot{Q}_{ORC} = \dot{Q}_{ORCP} + \dot{Q}_{ORCw}$	MWt	120,4	84,2	73,7	65,5
\dot{Q}_{ORCP}	MWt	55,1	55,1	55,1	55,1
\dot{Q}_{ORCw}	MWt	65,3	29,1	18,6	10,4
$\dot{Q}_{reg} = \dot{Q}_{regw} + \dot{Q}_{regORC}$	MWt	89,4	89,4	89,4	89,4
\dot{Q}_{regw}	MWt	89,4	85,4	81,3	89,4
\dot{Q}_{regORC}	MWt	0,0	4,0	8,1	0,0
$\dot{Q}_w^{90} = \dot{Q}_{ORCw} + \dot{Q}_{regw}$	MWt	154,7	114,5	99,9	99,8
\dot{m}_w	kg/s	920	680	594	594

5 Wnioski

Moc elektryczną bloku brutto i sprawność elektryczną bloku brutto oszacowano na poziomie $N_{elB} = 899,49$ MWe i $\eta_{elB} = 49,07$ %. Należy podkreślić, że dane

literaturowe wynosiły odpowiednio: $N_{elB} = 900$ MWe i $\eta_{elB} = 49,10\%$. Ponadto zamodelowano rozkłady temperatury w wymiennikach ciepła zgodnie z założeniami, co pozwoliło na uzyskanie poprawnych parametrów termodynamicznych w poszczególnych punktach charakterystycznych obiegu. Świadczy to o poprawnym modelu numerycznym przyjętym do obliczeń. Do oszacowania parametrów eksploatacyjnych bloku bez i z układem ORC użyto komercyjnego kodu numerycznego Aspen Plus. Analiza pracy bloku nadkrytycznego współpracującego z obiegiem ORC pozwoliła ustalić wzrost mocy całego bloku o $\Delta_{elBO} = 16,51$ MWe i sprawności odniesienia o $\Delta\eta_{od} = 0,406\%$ dla propanu, najkorzystniejszego czynnika, oraz o $\Delta_{elBO} = 16,03$ MWe i o $\Delta\eta_{od} = 0,379\%$ dla etanolu – czynnika drugiego z kolei. Należy również dodać, że sprawność obiegu ORC z propanem wynosi $10,07\%$, a z etanolem $17,76\%$. Najwięcej ciepła z wody podgrzanej do $90\text{ }^\circ\text{C}$ z systemu skraplania spalin pobiera propan $\dot{Q}_w^{90} = 154,7$ MWt, a najmniej etanol $\dot{Q}_w^{90} = 99,8$ MWt.

Praca wpłynęła do redakcji w sierpniu 2012 r.

Literatura

- [1] Badur J.: *Pięć wykładów ze współczesnej termomechaniki płynów*. www.imp.gda.pl/fileadmin/doc/o2/z3/.../2005-piecwykladow.pdf, Gdańsk 2005.
- [2] Badur J.: *Rozwój pojęcia energii*. Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 2009.
- [3] Badur J., Lemański M., Ziółkowski P., Kaczmarczyk O.: *Analiza numeryczna parametrów eksploatacyjnych obiegu cieplnego bloku nadkrytycznego w Elektrowni Jaworzno III wraz z systemem odzysku ciepła w układzie ORC*. Oprac. wewn. 4/2012, Gdańsk 2012.
- [4] Bartela Ł., Skorek-Osikowska A., Kotowicz J.: *Integracja bloku elektrociepłowni węglowej na parametry nadkrytyczne z instalacją wychwytu dwutlenku węgla oraz turbiną gazową*. Rynek Energii **100**(2012), 3, 56–62.
- [5] Lemański M.: *Koncepcja siłowni na czynnik niskowrzący*. Praca magisterska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2002.
- [6] Mikielwicz D., Gliński M., Wajs J.: *Krytyczny strumień ciepła podczas wrzenia w przepływie w kanałach*. Technika chłodnicza i klimatyzacyjna, nr 2/2007, 54–59.
- [7] Mikielwicz D., Mikielwicz J.: *A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP*. Appl. Thermal Eng. **30**(2010), 2357–2362.
- [8] Mikielwicz J.: *O wielkich ideach prof. Roberta Szewalskiego w technice turbinowej*. Materiały Uroczystej Sesji poświęconej 100-leciu Urodzin prof. Roberta Szewalskiego, Gdańsk 2002.
- [9] Mikielwicz J.: *Wybrane zagadnienia generacji pary czynnika niskowrzącego w obiegu siłowni dwuczynnikowej*. Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 1972.

- [10] Mikielewicz J., Mikielewicz D.: *Dynamika wymienników ciepła i niestabilności w obiegu ORC*. Rocznik Ochrona Środowiska, **13**(2011), 393–408.
- [11] Pawlik M., Kotlicki T.: *Innowacyjne technologie węglowe dla ograniczenia emisji CO₂*. Rynek Energii **94**(2011), 3, 60–68.
- [12] Szewalski R.: *Aktualne problemy rozwoju techniki energetycznej. Podwyższanie mocy jednostkowej i sprawności turbin oraz bloków energetycznych*. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1978.
- [13] Wójs K., Polko K., Lichota J.: *Kondensacyjny odzysk ciepła ze spalin*. Rynek Energii **100**(2012), 101–113.
- [14] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 w sprawie emisji przemysłowych, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L334/17, 17.12.2010.
- [15] Obieg wyjściowy (bazowy), Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska 2011.
- [16] <http://www.elbelchatow.pgegiek.pl>
- [17] <http://www.energetyka.e-bmp.pl/nadzieja-w-nadkrytycznych-parametrach>
- [18] Mikielewicz D., Mikielewicz J.: *Utilisation of bleed steam heat to increase the upper heat source temperature in low-temperature ORC*. Archives of Thermodynamics **32**(2011), 57–70.

Thermodynamic analysis of the supercritical 900MWe power unit, co-operating with an ORC cycle

S u m m a r y

The paper presents thermodynamic analysis of the supercritical 900 MWe power unit, co-operating with an ORC cycle. Numerical simulations of the power unit at its nominal operating conditions were conducted to compute its power and electric efficiency. Furthermore, operation of the power unit with an ORC medium was conducted for four types of the medium, i.e., propane, isobutene, pentane and ethanol. As a heat source for the ORC setup, water from the heat recovery system at the temperature of 90 °C, supported with steam extracted from the steam turbine, was used. The analysis was performed with use of CFM type numerical codes.