

Nowoczesne bloki węglowe w krajowym systemie elektroenergetycznym

dr inż. Janusz Buchta, dr inż. Andrzej Oziemski
Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

W artykule przedstawiono podstawowe trendy rozwojowe współczesnych bloków parowych. Przedstawiono podstawowe metody wzrostu sprawności stosowane w wysokosprawnych blokach węglowych na nadkrytyczne parametry pary. Scharakteryzowano zmiany w stosowanych materiałach konstrukcyjnych kotłów i turbin, jak również innowacyjne rozwiązania stosowane w tych urządzeniach.

1. Wprowadzenie

W 2019 roku przekazane zostały do eksploatacji 2 nowe bloki o mocy 900 MW w Elektrowni Opole. W ten sposób powiększyła się do sześciu grupa bloków na parametry nadkrytyczne pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym. Pierwsza tego rodzaju jednostka została zbudowana w 2008 roku w Elektrowni Pątnów. W bieżącym roku zaplanowano uruchomienie kolejnych dwóch nowoczesnych bloków w Elektrowni Jaworzno 3 oraz w Elektrowni Turów. Nowe jednostki wytwórcze nie odbiegają parametrami od najnowocześniejszych rozwiązań światowych, zapewniają najwyższy poziom sprawności wytwarzania energii elektrycznej. Czym charakteryzują się nowe bloki elektrowni parowych? Na to pytanie autorzy starają się odpowiedzieć w niniejszym artykule.

Z początkiem ostatniej dekady XX wieku technologie węglowe wykorzystywane w produkcji energii elektrycznej weszły w nowy etap rozwoju charakteryzujący się przejściem na parametry nadkrytyczne: ciśnienie 25÷28,5 MPa, temperatura 550÷585°C. Nastąpił wzrost sprawności netto wytwarzania energii elektrycznej, najpierw do poziomu 42% (pierwsze instalacje z lat 1990–1991), a następnie do 47% w 1999 r. Rozwój inżynierii

materiałowej, w tym opracowanie produkcji nowych gatunków stali, pozwala dziś na bezpieczne i niezawodne podniesienie parametrów pary świeżej do 30 MPa i 600÷620°C, temperatury wody zasilającej do 300°C i znaczne (o 7÷8 punktów procentowych) zwiększenie sprawności netto wytwarzania energii elektrycznej. Jest to istotne, ponieważ zwiększenie sprawności jest, jak dotychczas, podstawowym i najprostszym działaniem ograniczającym emisję CO₂. Wzrost sprawności to oszczędność zasobów paliwa i mniejsze obciążenia środowiska ciepłem opadowym oraz innymi substancjami emitowanymi przez elektrownie. Zastępowanie wyeksploatowanych bloków węglowych o sprawności wytwarzania netto 33÷35% nowymi blokami na parametry nadkrytyczne pozwala znacząco ograniczać emisję dwutlenku węgla.

Stosowane w tych blokach wysokosprawne instalacje: spalania i odpylania i odsiarczania pozwalają spełnić surowe wymagania odnośnie limitów emisji SO₂, NO_x oraz pyłu. Bloki na parametry nadkrytyczne spełniają także surowe wymagania ENTSO-E (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*) dotyczące elastyczności ruchowej.

W tabeli 1. przedstawiono dane dotyczące bloków na parametry nadkrytyczne eksploatowanych i budowanych w Polsce. Tabela zawiera informacje na temat parametrów technicznych jednostek wytwórczych, ale także czasu realizacji inwestycji i poniesionych nakładów. Na rys. 1. przedstawiono ścieżkę wzrostu sprawności wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach węglowych w Polsce i Niemczech oraz perspektywę jej zwiększenia w przypadku zrealizowania jednostki klasy AD700 na parę o temperaturze 700°C.

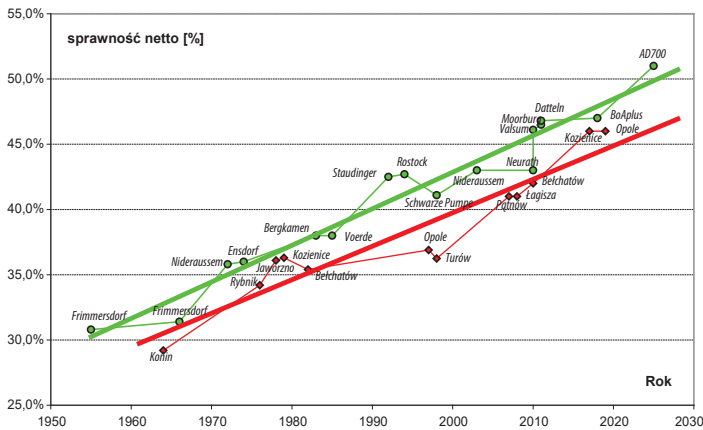
2. Wysokosprawne bloki węglowe

Aktualny poziom rozwoju technologii węglowej wyznaczają bloki nadkrytyczne nowej generacji o sprawności netto dochodzącej do 47% dla węgla kamiennego i do 43,5% dla węgla brunatnego. Stan ten został osiągnięty poprzez zastosowanie szeregu innowacji w tradycyjnym obiegu

Tabela 1. Zestawienie danych dotyczących bloków na parametry nadkrytyczne w Polsce

Nazwa elektrowni	Rok uruch.	Moc bloku [MW]	Paliwo	Parametry czynnika		η_{br}/η_{net} [%]	Koszt budowy	Producent kotła/turbozespołu	Czas budowy
				$p_1/t_1/t_m$ [MPa/°C/°C]	t_{wz} [°C]				
Pątnów II	2008	464	wb	25,8/540/568	273	44/41	580 mln €	Rafako- Alstom / Alstom Power	6 lat
Łagisza	2009	460	wk	27,5/560/582	285	45/41,7	~2 mld zł	Foster Wheeler / Alstom Power	42 m-ce
Bełchatów	2011	858	wb	25,2/550/582	278	-/41,7	1,2 mld €	Rafako-Alstom / Alstom	52 m-ce
Kozienice	2017	1075	wk	24,3/600/620	315	-/45,6	6,4 mld zł	MHPS Europe / MHPS Japan	62 m-ce
Opole	2019	2x900	wk	26,0/600/610	295	-/45,5	11,6 mld zł	GE Power	66 m-cy
Jaworzno 3	2020	910	wk	27,5/600/610	305	-/45,9	~6,2 mld zł	Rafako / Siemens	~65 m-cy
Turów	2020	496	wb	28,5/600/610		45/ 43,4	~4 mld zł	MHPS Europe / MHPS Japan	~6 lat

Objaśnienia: wb – węgiel brunatny, wk – węgiel kamienny, $p_1/t_1/t_m$ – ciśnienie pary świeżej, temperatura pary świeżej, temperatura pary wtórnie przegranej, t_{wz} – temperatura wody zasilającej kocioł, η_{br}/η_{net} – sprawność brutto i netto bloku.



Rys. 1. Ścieżka wzrostu sprawności wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach węglowych w Polsce i Niemczech oraz perspektywy jej zwiększenia

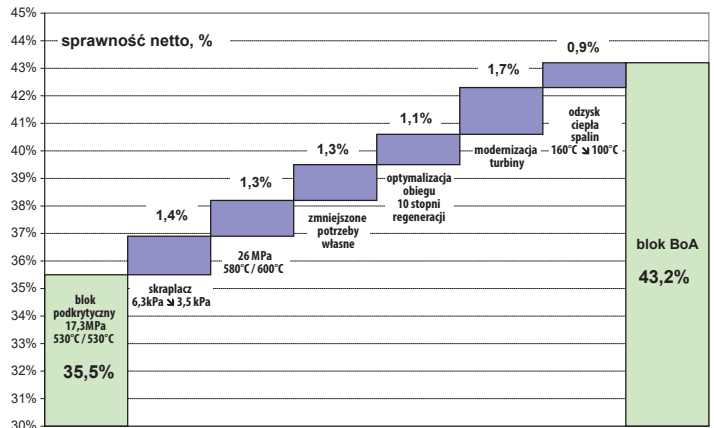
parowym Rankine'a. Podstawową cechą wyróżniającą nową generację bloków węglowych jest wzrost parametrów początkowych czynnika roboczego w tradycyjnym obiegu parowym Rankine'a. W przypadku ciśnień nadkrytycznych wytwarzanie pary w kotle odbywa się z ominięciem obszaru pary mokrej. Przejście czynnika roboczego z fazy ciekłej w fazę gazową odbywa się w sposób niezauważalny, co ma zasadniczy wpływ na organizację układu wodno-parowego w kotle.

Do najważniejszych innowacyjnych przedsięwzięć zastosowanych w tradycyjnym obiegu parowym Rankine'a, które przyniosły wzrost sprawności ogólnej elektrowni należą:

- wzrost parametrów początkowych obiegu poprzez wzrost temperatury i ciśnienia pary świeżej odpowiednio do $25 \div 30$ MPa i $580 \div 610^\circ\text{C}$; temperatura pary wtórnie przegrzanej jest zwykle wyższa od temperatury pary pierwotnie przegrzanej; możliwy dzięki osiągnięciom inżynierii materiałowej i zastosowaniu nowych materiałów na elementy krytyczne kotłów i turbin;
- zmniejszenie parametrów końcowych obiegu poprzez obniżenie ciśnienia w skraplaczu do poziomu $2,2 \div 2,5$ kPa przy chłodzeniu skraplacza wodą morską (Dania) oraz $3,5 \div 4,2$ kPa w układzie z chłodzią kominową (zależnie od warunków klimatycznych); możliwe dzięki odpowiedniej konstrukcji części wylotowej turbiny (liczba wylotów, długość i kształt ostatnich rzędów łopatek), skraplacza oraz chłodzi kominowej o zwiększonej strefie chłodzenia (12°C);
- modernizacja konstrukcji i układu przepływowego turbin; stosowanie modelowania CFD (*computational fluid dynamics*) w projektowaniu; stosowanie łopatek 3D zaprojektowanych dla trójwymiarowych warunków przepływu pary (tzw. łopatki „bananowe”); podniesienie sprawności wewnętrznej turbin do rekordowego poziomu 94,2% w części wysokoprężnej (WP), 96,1% w części średnioprężnej (SP) i 93,6% w części niskoprężnej (NP) [4];
- udoskonalenie procesu spalania i konstrukcji kotłów; redukcja nadmiaru powietrza do spalania w kotle; podniesienie sprawności kotłów do poziomu 94,5%;
- optymalizacja obiegu cieplnego – dobór optymalnych ciśnień pary w układzie regeneracji (w upustach), stosowanie podgrzewaczy trójstrefowych, optymalne spiętrzenia temperatury w podgrzewaczach powierzchniowych;
- zwiększenie liczby stopni podgrzewania regeneracyjnego do 9–10 i podniesienie temperatury wody zasilającej do $290 \div 300^\circ\text{C}$;
- wykorzystanie ciepła spalin wylotowych z kotła do podgrzewania czynnika roboczego w układzie regeneracji nisko- i wysokoprężnej; obniżenie temperatury spalin do poziomu ok. 100°C ;
- wyeliminowanie podgrzewania spalin za instalacją odsiarczania spalin;

- optymalizacja układu potrzeb własnych, zmniejszenie zużycia energii przez urządzenia pomocnicze.

Potencjał wzrostu sprawności elektrowni poprzez zastosowanie poszczególnych metod został zilustrowany na rys. 2. dla przypadku bloku na węgiel brunatny. Warto zwrócić uwagę na przyrosty sprawności wynoszące od 0,9 punktów procentowych do 1,7 punktów procentowych, odpowiadające zastosowanym rozwiązaniom zwiększającym sprawność.

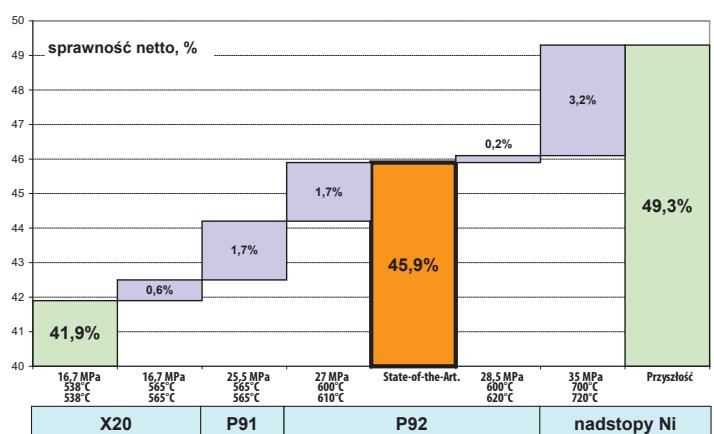


Rys. 2. Metody wzrostu sprawności w nadkrytycznym bloku na węgiel brunatny na przykładzie niemieckiego bloku BoA (Block mit optimierter Anlagentechnik) z zamkniętym obiegiem chłodzenia [8, 9]

3. Materiały na budowę kotłów i turbin

Począwszy od wczesnych lat 60., w instalacjach energetycznych pracujących w warunkach pełzania powszechnie stosowano stal wysokochromową X20CrMoV11-1. Pozwalała ona uzyskać poziom temperatury pary 560°C . Z końcem lat 80. dostępna była stal P91 i poziom temperatury pary 580°C . Począwszy od roku 2001 dostępna jest stal P92 i poziom temperatury pary 610°C .

Kolejny wzrost temperatury pary do poziomu 700°C stanie się możliwy dzięki nadstopom na osnowie niklu, które znajdują się u progu komercyjnych zastosowań. Wpływ parametrów początkowych obiegu i stosowanych materiałów konstrukcyjnych na sprawność netto elektrowni został przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Wpływ parametrów początkowych obiegu i stosowanych materiałów konstrukcyjnych na sprawność netto elektrowni (węgiel kamienny, obieg chłodzenia zamknięty) [6]

Osiągnięcie aktualnie stosowanego poziomu parametrów nadkrytycznej pary świeżej 30 MPa i $600 \div 610^\circ\text{C}$ stało się możliwe dzięki postępowi inżynierii materiałowej. Opanowana została technologia produkcji nowych gatunków stali martenzytycznych typu P91/T91, HCM12 i austenitycznych

chromowo-niklowych typu Essete 1250, TP347 czy Super 304H. Wymienione gatunki stali charakteryzują się obniżoną zawartością chromu (Cr) i węgla (C) oraz stosowaniem dodatków w postaci niklu (Ni), molibdenu (Mo), wanadu (V), niobu (Nb) i wolframu (W). Dodatki zwiększają odporność stali na korozję wysokotemperaturową, pękanie naprężeniowe oraz ułatwiają spawanie.

Materiały konstrukcyjne przeznaczone na budowę przegrzewaczy pary w kotłach na parametry nadkrytyczne są poddane działaniu szczególnie wysokich temperatur i ciśnień. Stale kotłowe muszą charakteryzować się znacznie wyższą wytrzymałością w wysokich temperaturach w porównaniu z innymi stalami. Od stali kotłowych wymaga się, aby były żarowytrzymałe i żaroodporne. Żaroodporność oznacza zdolność materiału do przeciwstawienia się korozji gazowej w podwyższonych temperaturach. Żarowytrzymałość oznacza odporność materiału na odkształcenia, zdolność do przenoszenia krótko- lub długotrwałych obciążeń w wysokiej temperaturze.

W celu zwiększenia żaroodporności stali stosuje się dodatki stopowe takie jak: chrom (Cr), krzem (Si) i aluminium (Al). Dodatki te chronią stal przed utlenianiem ze względu na ich większe powinowactwo do tlenu niż żelazo. Tworzą szczelne warstewki tlenków Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , które utrudniają wnikanie tlenu w głąb metalu. Wyższa temperatura pracy danego elementu wymaga większej zawartości pierwiastka stopowego dla zapewnienia żaroodporności. Węgiel zawarty w stali pogarsza jej odporność na korozję, szczególnie wtedy, gdy występuje w niej w postaci węglików.

4. Kotły i turbiny bloków parowych na parametry nadkrytyczne

W blokach na nadkrytyczne parametry pary szerokie zastosowanie znalazły kotły przepływowe typu Bensona. Konstrukcja kotłów przepływowych ma już ponad 60-letnią historię. Zasada pracy tego typu kotłów jest ogólnie znana [1] i nie będzie tutaj omawiana. Do najistotniejszych cech kotłów przepływowych w blokach nadkrytycznych należą [3]:

- wysoka sprawność,
- duża elastyczność ruchowa – możliwość nadążania za nagłymi zmianami obciążenia oraz praca na parametrach poślizgowych w warunkach obciążenia częściowego,
- konieczność stosowania czułych i szybko działających układów regulacji,
- brak stałego punktu odparowania wody, punkt ten przemieszcza się w zależności od obciążenia kotła,
- zwiększone powierzchnie wymiany ciepła spowodowane mniejszymi gradientami temperatur w wymianie ciepła i wyższymi temperaturami końcowymi pary przegrzanej,
- ekstremalnie wysokie wymagania w stosunku do czystości wody zasilającej kocioł,
- niewrażliwość wydajności i parametrów pary z kotła na zmienne właściwości paliwa.

Ponadto w porównaniu z kotłami walczakowymi stosowanymi dla parametrów podkrytycznych, kotły przepływowe charakteryzuje większa wartość dopuszczalnego gradientu zmian temperatury, co jest istotne ze względu na skrócenie czasu rozruchu kotła. W parownikach kotłów przepływowych stosowane są rury ożebrowane wewnątrz (ryflowane). Poprawia to wymianę ciepła poprzez odrzucanie cząstek wody na ścianki dzięki większej turbulencji. Intensyfikacja wymiany ciepła umożliwia użycie pionowych rur ekranowych z małym strumieniem masy bez ryzyka przegrzania rur [5].

Stosowane są zarówno kotły o sylwetce jednociągowej (wieżowe), jak i dwuciągowej [1]. Kotły jednociągowe są szczególnie korzystne w przypadku spalania paliwa o dużej zawartości popiołu lub silnych właściwościach korozyjnych popiołu. Charakteryzują się znaczną wysokością, dochodzącą do 165 m. Kotły o sylwetce dwuciągowej mają mniejszą wysokość (do 70 m) i kompaktową komorę spalania. Kotły dwuciągowe na nadkrytyczne para-

metry pary częściej występują w USA i Japonii aniżeli w Europie, co wynika z tradycji lokalnych dostawców kotłów.

Wśród kotłów na parametry nadkrytyczne dominują kotły pyłowe. Pierwszy na świecie blok na parametry nadkrytyczne z kotłem fluidalnym ze złożem cyrkulacyjnym uruchomiony został w polskiej Elektrowni Łagisza.

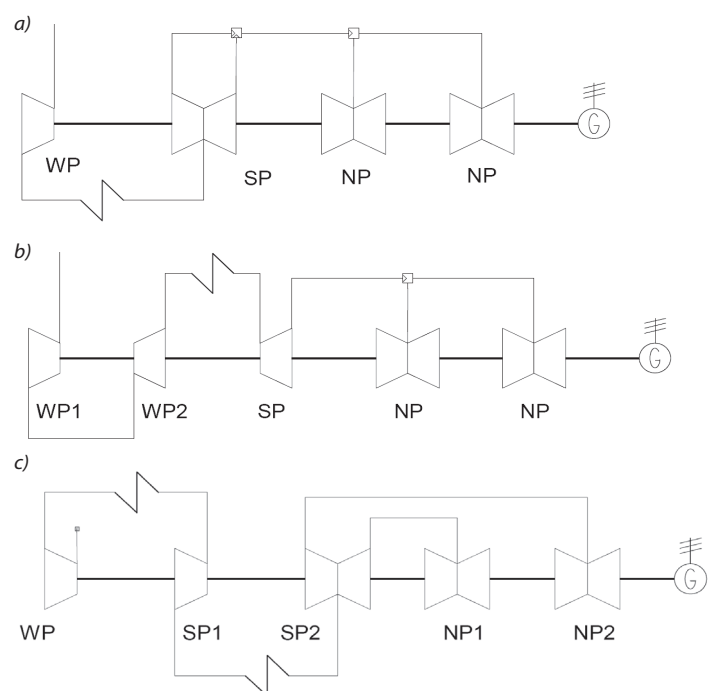
Interesującą innowacją, odmienną od dotychczasowych kanonów, jest projekt kotła poziomego, przeznaczony dla przyszłościowego bloku na parametry ultranadkrytyczne 35 MPa/700/720°C. Firma Siemens opracowała całkowicie nowy typ kotła przepływowego. Konstrukcja kotła w układzie z paleniskiem poziomym radykalnie zmniejsza jego wysokość, trzykrotnie w stosunku do równoważnego kotła wieżowego. W założeniu poziomy układ kotła ma ograniczyć koszty budowy i zminimalizować udział drogich stopów niklowych dzięki znacznemu skróceniu rurociągów pary świeżej i wtórnie przegrzanej łączących kocioł i turbinę [5].

Turbiny na parametry nadkrytyczne pracują w klasycznej konfiguracji obejmującej część wysokoprężną (WP), średnioprężną (SP) i niskoprężną (NP). Przykłady rozpliwów pary w turbinach na parametry nadkrytyczne przedstawiono na rys. 4. Z zamieszczonych schematów wynika, że w przypadku turbin o większych mocach część niskoprężna jest wielowylotowa, przy czym najczęściej liczba wylotów wynosi 4 lub 6.

Na rys. 4b przedstawiono przykład turbiny przeznaczonej do temperatury pary 700°C, w której przewidziano dwie rozdzielone części wysokoprężne WP1 i WP2. Część WP1 pracuje w zakresie najwyższych temperatur, a jej kadłub wewnętrzny i wirnik musi być wykonany ze stopów niklu. Część WP2 pracuje w zakresie niższych temperatur i może być wykonana ze stali martenzytycznych. Część SP turbiny musi być wykonana podobnie jak część WP1. Ciekawym rozwiązaniem jest stosowanie w niektórych przypadkach wspólnego kadłuba części WP i SP turbiny (np. bloki 600 MW). Takie „zblokowanie” pozwala zmniejszyć gabaryty turbiny, a tym samym koszty jej budowy i fundamentowania.

Z kolei na rys. 4c przedstawiono rozpliw pary dla przypadku podwójnego przegrzewu międzystopniowego (blok Convoy). Turbina posiada dwa kadłuby średnioprężne, przy czym część SP2 jest niesymetryczna (niesymetryczne upusty i ciśnienia na wylocie) [7].

Wysiłki producentów turbin nie są wyłącznie skoncentrowane na podwyższaniu parametrów początkowych, ale także na optymalizowaniu „zimnego” końca turbiny. W przypadku stopnia wylotowego turbiny, długości łopatek ok. 1200 mm i prędkości 3000 obr/min, wyczerpują się możliwości



Rys. 4. Organizacja rozpliwu pary w turbinach na parametry nadkrytyczne

stosowania stali jako materiału łopatkowego. Od kilku lat stosowane są łopatki o długości do 1500 mm wykonane ze stopów tytanu (Ti-5Al, Ti-6Al 4V, Ti-6Al-6V-2Sn) [4, 11].

5. Podsumowanie

Dalszy wzrost sprawności elektrowni węglowych możliwy będzie poprzez skokowe zwiększenie początkowych parametrów pary do poziomu 35÷37,5 MPa i 700/720°C, które znajdują się w zakresie tzw. parametrów ultranadkrytycznych. Zastosowanie takiego pułapu parametrów stwarza możliwość przekroczenia 50%, a być może nawet osiągnięcia 55% sprawności netto wytwarzania energii elektrycznej. Stanie się to możliwe dzięki stosowaniu stopów na bazie niklu.

W Europie i USA prowadzone są prace badawcze zmierzające do opanowania i wdrożenia nowej technologii. Już w 1998 r. rozpoczęto realizację programu AD700 (*Advanced Supercritical 700°C Coal-Fired Power Plant*) finansowanego przez UE. Jego celem było określenie opłacalności dalszego rozwoju technologii PF. W jego realizację włączonych było ok. 40 firm europejskich. Począwszy od 2003 r. realizowano program COMTES 700 (*Component Test Facility*) finansowany przez RFCS (*Research Fund for Coal and Steel*) oraz Emax (grupa koncernów energetycznych). Cele programu COMTES to:

- opanowanie parametrów ultranadkrytycznych 35÷37,5 MPa i 700/720°C,
- zastosowanie nowych superstopów na bazie niklu na wysokotemperaturowe elementy krytyczne kotła i turbiny,
- testowanie krytycznych elementów instalacji (minimum 30 tys. godzin pracy w temperaturze powyżej 700°C).

Zwieńczeniem programu AD700 będzie prawdopodobnie realizacja demonstracyjnego bloku energetycznego o mocy ok. 500 MW na parametry 35 MPa/700/720°C, zlokalizowanego w Wilhelmshaven (Niemcy), w ramach projektu „50+” koncernu E.ON. Duński koncern Dong Energy także zamierza zbudować dwa bloki 800 MW na parametry ultranadkrytyczne w niemieckiej elektrowni Greifswald. W USA, tamtejszy Departament Energii (DOE) współfinansuje badania zmierzające do opanowania jeszcze wyższej temperatury początkowej, tj. 760°C (1400°F) w klasycznych blokach opalanych węglem [1, 5].

Na uwagę zasługuje również realizowany w Polsce w latach 2010–2015 Program Strategiczny „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, zadanie 1 „Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zeroemisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin”, w ramach którego prowadzono prace badawcze dotyczące jednostki wytórczej na ultranadkrytyczne parametry pary 30 MPa/650°C/670°C [12].

Bibliografia

- [1] Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, WNT, Warszawa 2016.
- [2] Paska J., *Wytwarzanie energii elektrycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją G. Kosmana, A. Rusina, J. Talera i M. Pawlika, *Zagadnienia projektowania i eksploatacji kotłów i turbin do nadkrytycznych bloków węglowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [4] Leyzerovich A. S., *Steam Turbines for Modern Fossil-Fuel Power Plants*, The Fairmont Press Inc., 2007.
- [5] Pawlik, M., Kotlicki, T., *Innowacyjne technologie węglowe dla ograniczania emisji CO₂*, Rynek Energii 2011 vol. 94, nr 3, s. 57–63.
- [6] Czieśla F., Kremer H., Much U., Riemschneider J. E., Quinkertz R., *Advanced 800+ MW Steam Power Plants and Future CCS Options*, COAL-GEN Europe 2009 – Katowice, Poland, 2009.
- [7] Kjeaar S., *Status and future of advanced PF power plants*, Energy Conversion and Management. Volume 37, Issues 6-8, June-August 1996, s. 897–902.
- [8] RWE Energie: *Założenia do projektu BoA w Elektrowni Niderausen*, Materiały Seminarium Naukowo-Technicznego „Wysokosprawne bloki energetyczne”, Słok, listopad 1996, s. 145–176.
- [9] Tippkötter T., *Elektrownia na węgiel brunatny ze zoptymalizowaną techniką instalacji*, Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej „Elektrownie ciepłe”, Słok, wrzesień 2001.
- [10] Nyqvist J., Faellman S., Lahoda J., *Upgrading of industrial steam turbine SST-900 to meet new customer requirements in utility and industrial applications*, POWER-GEN Asia 2008, Kuala Lumpur, Malezja, 2008.
- [11] Ulm W., *The situation in steam turbine construction and current development trends*, OMMI (vol. 2, issue 3), December 2003.
- [12] Praca zbiorowa pod redakcją T. Chmielniaka i H. Łukowicza, *Modelowanie i optymalizacja węglowych bloków energetycznych z wychwytem CO₂*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.