

doi:10.15199/48.2016.10.16

Wielokryterialna analiza porównawcza jednostek wytwórczych w elektrowniach jądrowych i konwencjonalnych na wybranych przykładach

Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę porównawczą elektrowni jądrowej z elektrowniami konwencjonalnymi opalonymi węglem kamiennym oraz węglem brunatnym. Została przedstawiona zasada działania wyżej wspomnianych jednostek, wyszczególniono ich parametry, a także wskazano ich wady oraz zalety.

Abstract. In article conducted a comparative analysis of nuclear power plant with the conventional coal-fired power plants on hard coal and ignite. The paper presents the structure and principle of operation of the abovementioned units, specified their parameters and indicated their advantages and disadvantages. (Multi-criterial comparative analysis of the generating units at nuclear power plants and conventional power plants on selected examples).

Słowa kluczowe: energetyka jądrowa, energetyka konwencjonalna, blok na parametry nadkrytyczne, reaktor wodnociśnieniowy

Keywords: nuclear power, conventional power, supercritical parameters unit, pressurized water reactor

Wstęp

W dużych jednostkach wytwórczych w energetyce zawodowej stosuje się technologie węglowe lub alternatywnie jądrowe. Ze względu na rosnące ceny paliw oraz aspekty środowiskowe zarówno jedne jak i drugie powinny cechować się wysoką efektywnością wytwarzania energii elektrycznej i/lub energii cieplnej. Przykładem jednostek, mogących w dużym stopniu przyczynić się w Polsce nie tylko do zmniejszenia zapotrzebowania na węgiel, ale również zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery są elektrownie konwencjonalne na parametry nadkrytyczne. Przejście na takie parametry wiąże się z wyraźną zmianą jakościową i technologiczną przynoszącą ogromne korzyści dla całego przemysłu energetycznego, powodując chociażby wzrost sprawności bloków energetycznych o 10-11 punktów procentowych, oszczędności finansowe, czy wyżej wspomniane aspekty środowiskowe. Zainteresowanie tego rodzaju technologiami pojawiło się już w latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia w Stanach Zjednoczonych, gdzie z powodzeniem powstawały pierwsze konstrukcje. Jednak w wyniku niskich cen węgla oraz ignorowania problemów związanych z ochroną środowiska, znaczenie tego rodzaju urządzeń zdecydowanie zmalało. Obecnie kotły na parametry nadkrytyczne wracają do łask, o czym świadczą realizowane i już wykonane inwestycje na świecie, w tym również w Polsce.

Z drugiej strony otwiera się przed nami perspektywa budowy pierwszej w Polsce elektrowni jądrowej. W związku z tym również należałoby się przyjrzeć tego rodzaju technologii, która jak powszechnie wiadomo nie generuje zanieczyszczeń do atmosfery, produkuje tanią energię elektryczną, a co więcej pozwoliłaby nieco zdywersyfikować strukturę wytwarzania energii w naszym kraju.

Celem poniżej pracy jest przedstawienie problemu związanego z budową nowych jednostek wytwórczych w Polsce. W pracy zostały ze sobą zestawione dwie zgoła odmienne technologie – jądrowa oraz konwencjonalna. Technologie jądrowe reprezentowane są przez elektrownię z reaktorem AP1000, jedną z najnowocześniejszych, najefektywniejszych i najdoskonalszych konstrukcji, która ma duże szanse na pojawienie się na terenach Polski. Z drugiej strony zaprezentowano dwie konstrukcje konwencjonalne – opalany węglem brunatnym blok energetyczny 858 MW w Bełchatowie oraz opalany węglem kamiennym blok 910 MW przewidywany do uruchomienia w

Elektrowni Jaworzno III. Jednostki te zostały ze sobą zestawione i poddane analizie porównawczej pod względem efektywności, opłacalności, kosztów wytwarzania energii, nakładów inwestycyjnych, sprawności przetwarzania energii oraz bezpieczeństwa eksploatacji.

Elektrownie na parametry nadkrytyczne

Proces wytwarzania energii elektrycznej w konwencjonalnej elektrowni cieplnej można podzielić na trzy etapy. Pierwszy etap obejmuje zamianę energii chemicznej zawartej w paliwie (węglu kamiennym bądź brunatnym) na energię cieplną. Takie przekształcenie jest możliwe dzięki procesowi spalania. Uzyskana w ten sposób energia cieplna jest następnie przekazywana czynnikowi robocznemu. W drugim etapie para wodna kierowana jest do turbin parowej, w której wykonuje pracę przekształcając energię cieplną na energię mechaniczną. W przeciwieństwie do turbin w elektrowni jądrowej, turbiny w elektrowniach konwencjonalnych są trzystopniowe (części niskoprężna, średnioprężna i wysokoprężna). Trzeci etap charakteryzuje się zamianą energii mechanicznej na energię elektryczną w generatorze sprzęgniętym z turbiną parową [1,2].

Główną różnicą pomiędzy elektrownią podkrytyczną a nadkrytyczną jest wyższa temperatura i ciśnienie czynnika roboczego, przekraczające punkt krytyczny ($t_{kr} = 374,15^{\circ}\text{C}$ oraz $p_{kr} = 22,13 \text{ MPa}$). W takich warunkach woda staje się parą suchą nasyconą, bez konieczności doprowadzania ciepła [1,2].

W elektrowni parowej do paleniska kotła doprowadza się paliwo oraz powietrze, niezbędne do przeprowadzenia procesu spalania. W wyniku niecałkowitego spalania powstają odpady w postaci żużlu i popiołu, które systematycznie są usuwane z kotła. Gorące spaliny ogrzewają powierzchnie ogrzewalne przez które przepływa czynnik roboczy. Po wytworzeniu w kotle pary przegrzanej kieruje się ją następnie do turbin, w której ulega rozprężeniu. Energia cieplna przekształca się w energię mechaniczną. Para, po rozprężeniu do możliwie najniższego ciśnienia, podlega skropleniu w skraplaczu. Otrzymany w ten sposób kondensat tłoczony jest pompą skroplin do zbiornika wody zasilającej, z którego jest za pomocą pompy wody zasilającej ponownie podawana do kotła, po czym cały proces ulega powtórzeniu. W celu zwiększenia sprawności zwiększa się temperaturę wody zasilającej w podgrzewaczu regeneracyjnym, do którego doprowadza się część pary z turbin. Straty czynnika

roboczego w obiegu cieplnym elektrowni konwencjonalnej uzupełnia się wcześniej przygotowaną wodą. Odbiór ciepła od pary opuszczającej turbinę odbywa się w układzie chłodzenia obejmującym skraplacz i chłodnię kominową lub otwarte źródło wody. W pierwszym wymienionym układzie, nazywanym w układem zamkniętym, para podlega skropleniu w chłodni kominowej, po czym woda tłoczona jest pompą z powrotem do skraplacza. W układzie otwartym chłodnię kominową zastępuje odpowiednio duże źródło wody, którym może być rzeka, jezioro lub morze. Z otwartego źródła wody pobierana jest za pomocą pompy woda, którą kieruje się do skraplacza. Przepływając przez rurki skraplacza zimna woda odbiera ciepło od pary, powodując jej skroplenie, po czym wraca do otwartego źródła [1].

Elektrownie jądrowe

Zasada działania elektrowni jądrowej jest zbliżona do zasady działania standardowej elektrowni konwencjonalnej opalanej węglem. Różnica między nimi tkwi w sposobie wytwarzania ciepła, gdyż w elektrowni jądrowej zostaje ono generowane w reaktorze jądrowym, wskutek rozszczepienia jąder atomów paliwa jądrowego (np. uranu), natomiast w elektrowni węglowej energia cieplna uzyskiwana jest w kotle, wskutek procesu spalania węgla. W reaktorach PWR rdzeń reaktora znajduje się w zbiorniku wypełnionym wodą, która spełnia rolę moderatora, chłodziwa oraz reflektora. Woda jest tanią i bezpieczną substancją o doskonale znanych właściwościach termodynamicznych. Wysoce aktywna woda obiegu pierwotnego, pod bardzo wysokim ciśnieniem 12-16 MPa i temperaturze rzędu 300-350°C kierowana jest do wytwornicy pary, w której przepływa przez dużą liczbę rurek. Rurki wymiennika ciepła omywane są z drugiej strony wodą obiegu wtórnego, w którym panuje dużo niższe ciśnienie rzędu 5-6 MPa. Po odebraniu ciepła od obiegu pierwotnego woda w obiegu wtórnym zaczyna parować. Ograniczenia mocy maksymalnej pomp wymuszają podzielenie obiegu pierwotnego na kilka pętli – instalacji zawierających komplet urządzeń połączonych ze sobą rurociągami łączących reaktor z wytwornicą pary. Para wodna po opuszczeniu wytwornicy pary trafia do osuszacza i przegrzewacza, w którym nie tylko pozbywa się wilgoci, ale również zwiększa się jej temperatura do około 300°C. Kondensat otrzymany w osuszaczu trafia do odgazowywacza [3].

Analiza porównawcza i wnioski

W tabeli 1 zestawiono główne parametry energetyczne bloku jądrowego z reaktorem AP1000 oraz bloków węglowych na parametry nadkrytyczne. Opisana w pracy elektrownia z reaktorem AP1000 cechuje się sprawnością wytwarzania na poziomie 32%, podczas gdy blok energetyczny na parametry nadkrytyczne w Elektrowni Jaworzno III sprawnością 47%, a blok 858 MW Elektrowni Bełchatów sprawnością 42%. Warto jednak zauważyć, że jednostkowa moc elektrowni jądrowej jest nieco wyższa od mocy elektrowni na parametry nadkrytyczne i wynosi 1100 MW przy 910 MW w Jaworznie oraz 858 MW w Bełchatowie. Kolejnym interesującym parametrem jest dyspozycyjność, której wartość dla każdej z opisanych jednostek jest bardzo duża. Ciekawym faktem jest, że największą dyspozycyjnością (>95%) cechuje się blok 910 MW, wyprzedzając o dwa punkty procentowe blok jądrowy. Dodatkowo, w tabeli 1, przedstawiono również parametry termodynamiczne czynnika roboczego. Na pierwszy rzut oka widać, że parametry pary bloków węglowych są dużo wyższe od parametrów pary obiegu wtórnego elektrowni jądrowej z AP1000. Niższe parametry pary wymuszają niejako zwiększenie przepływu pary, który dla elektrowni jądrowej jest około trzy razy większy niż dla elektrowni konwencjonalnych na parametry nadkrytyczne.

Tabela 1. Porównanie parametrów bloków energetycznych [4,5,6]

		AP1000	858 MW	910 MW
MOC ELEKTRYCZNA	MW	1100	858	910
MOC CIEPLNA	MW	3400	1952	1 832
SPRAWNOŚĆ	%	32	42	46
WSKAŹNIK DYSPOZYCYJNOŚCI	%	>93	> 88	> 95
PRZEPŁYW W WARUNKACH NORMALNYCH	kg/s	1889	644,16	657,74
TEMPERATURA PARY za wytwornicą pary/kotłem	°C	272,8	554	603,2
CIŚNIENIE PARY	MPa	5,76	26,60	28,51
CIŚNIENIE WODY ZASILAJĄCEJ przed wytwornicą pary/kotłem	MPa	15,51	30,50	32,41
TEMPERATURA WODY ZASILAJĄCEJ przed reaktorem/kotłem	°C	226,7	277,9	305,5
ŚREDNI PRZYROST TEMPERATURY	°C	46,1	276,1	297,7

Na podstawie przedstawionych w tabeli 1 parametrów, można wyznaczyć średni przyrost temperatury chłodziwa. W przedstawionym w pracy reaktorze wynosi on zaledwie 45,2°C (temperatura na wlocie do rdzenia: 279,4°C, temperatura na wylocie z rdzenia: 324,7°C). W obiegu wtórnym, średni przyrost temperatury czynnika roboczego wynosi natomiast 46,1°C (temperatura na wlocie do wytwornicy: 226,7°C, temperatura na wylocie z wytwornicy: 272,8°C). Z sytuacją odwrotną mamy do czynienia w elektrowniach węglowych. W opisanym bloku 910 MW temperatura na wejściu do kotła wynosi 305,5°C, a para świeża na wyjściu 603,2°C (wzrost temperatury czynnika wynosi 297,7°C). Dla bloku energetycznego 858 MW w Bełchatowie temperatura pary świeżej na wylocie z kotła jest nieco niższa i wynosi 554°C, natomiast temperatura wody zasilającej wynosi 277,9°C. Wzrost temperatury czynnika wynosi w tym przypadku aż 276,1°C. Jeśli zestawimy te wartości z wzrostem temperatury w wytwornicy pary w bloku z reaktorem AP1000 wynoszącym ledwie 46 stopni możemy dojść do wniosku, że w elektrowni jądrowych konieczny jest bardzo duży przepływ chłodziwa.

Różnica w sprawnościach wytwarzania energii elektrycznej pomiędzy blokiem jądrowym a blokami na parametry nadkrytyczne wynika przede wszystkim z ogromnych różnic pomiędzy parametrami termodynamicznymi czynnika roboczego, zastosowania dwóch obiegów oraz braku przegrzewu wtórnego paru w bloku jądrowym.

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 wyznaczono kilka wskaźników akcentujących różnice pomiędzy przedstawionymi jednostkami. Wyniki obliczeń zostały zawarte w tabeli 2. Dla wyznaczenia strumienia masy paliwa założono następujące wartości opałowe:

- uran U^{235} : 2 463 750 000 MJ/kg,
- węgiel brunatny: 8 MJ/kg,
- węgiel kamienny: 21 MJ/kg.

Tabela 2. Wskaźniki zużycia pary i paliwa dla bloków energetycznych

	jednostka	AP1000	858 MW	910 MW
ROCZNA PRODUKCJA ENERGII ELEKTRYCZNEJ	TWh	8,86	6,61	7,57
WSKAŹNIK JEDNOSTKOWEGO ZUŻYCIA PARY PRZEZ TURBINĘ	kg/MWs	1,72	0,75	0,72
STRUMIEŃ ENERGII DOSARCZANY W PALIWIE	MW	3197	2043	1978
STRUMIEŃ MASY PALIWA (ZUŻYCIE PALIWA)	kg/s	0,000013	255	94
JEDNOSTKOWE ZUŻYCIE PALIWA	kg/MWh	0,000042	1070	372
ROCZNE ZUŻYCIE PALIWA	mln ton	<u>0,405</u> tony U ²³⁵	7,07	2,82
GĘSTOŚĆ MOCY	MW/m ³	109,7	10	10

Jak widać na podstawie wyników obliczeń zestawionych w powyższej tabelicy, elektrownia jądrowa z reaktorem AP1000 cechuje się największą roczną produkcją energii elektrycznej. Dodatkowo, można zaobserwować, że wskaźnik jednostkowego zużycia pary przez turbinę również jest największy dla przedstawionej elektrowni jądrowej, a dla elektrowni konwencjonalnych na parametry nadkrytyczne jest niemal taki sami. Największe różnice występują jednak dla jednostkowego zużycia paliwa. Zastosowane w elektrowni jądrowej paliwo (opisane w następnym akapicie) cechuje się dużą gęstością mocy, dzięki czemu jego jednostkowe zużycie jest bardzo małe. W blokach węglowych również można zaobserwować znaczące różnice w zużyciu paliwa. W celu wyprodukowania 1 kWh w bloku 858 MW należy spalić 1,07 kg węgla przy około 0,37 kg w bloku 910 MW. Blok z reaktorem jądrowym AP1000 jest pod tym względem bezkonkurencyjny, gdyż na wyprodukowanie 1 MWh wymaga ledwie 0,000042 kg.

Paliwem w elektrowni z reaktorem AP1000 jest wzbogacony (4,8%) dwutlenek uranu UO₂, w postaci pastylek umieszczanych jest w prętach paliwowych. Cała ilość paliwa jądrowego jest wprowadzana do reaktora jednorazowo, po czym następuje normalna eksploatacja trwająca 18 miesięcy. Ciepło wydzielane w paliwie jądrowym przekazywane jest przez koszulkę do czynnika roboczego (wody). Wynika z tego, że gęstość mocy (stosunek mocy cieplnej jednostki do objętości reaktora/kotła) w elektrowniach jądrowych powinna być znacznie większa od gęstości mocy w elektrowniach konwencjonalnych, w których ciepło uzyskane w procesie spalania przekazywane jest poprzez powierzchnie ogrzewalne do wody bądź pary. Tak rzeczywiście jest, gdyż średnia gęstość mocy w reaktorze AP1000 wynosi aż 109,7 MW/m³ przy średniej gęstości mocy wynoszącej około 10 MW/m³ w paleniskach bloków węglowych. Między innymi dlatego blok jądrowy jest dużo mniejszy od bloku 910 MW czy 858 MW.

Zarówno w bloku 910 MW jak i w bloku 858 MW paliwo musi być dostarczane do komory paleniska w sposób ciągły, co wiąże się z koniecznością budowy zaawansowanych i rozbudowanych układów transportujących, składających, mielących i zaopatrujących kocioł w węgiel. Powoduje to również konieczność ciągłego

odbioru żużlu, popiołu oraz spalin. Co prawda kotły na parametry nadkrytyczne cechują się dużo wyższą sprawnością niż inne kotły, niemniej powstałe w wyniku niecałkowitego spalania produkty i tak wymagają ciągłego usuwania.

W tabeli 3 przedstawiono właściwości eksploatacyjne bloku jądrowego z reaktorem AP1000 oraz bloków węglowych na parametry nadkrytyczne.

Tabela 3. Właściwości eksploatacyjne bloków energetycznych [4,5,8]

	BLOK Z AP1000	BLOK 858 MW	BLOK 910 MW
ZAKRES ZMIAN OBCIĄŻENIA	15-100%	40-100%	40-100%
ZDOLNOŚĆ DO CZĘSTYCH ODSTAWIEŃ	znikoma	częściowa	częściowa
PROJEKTOWANY CZAS ŻYCIA ELEKTROWNI	60 lat	30 lat	30 lat
POWIERZCHNIA ELEKTROWNI NA 1 MW	6000 m ²	40000 m ²	40000 m ²

Elektrownia jądrowa z reaktorem AP1000 dzięki wysoce zautomatyzowanemu systemowi regulacji mocy może nie tylko pokrywać dobowe zmiany w systemie w szerokim zakresie, ale również nadaje się do regulacji częstotliwości. Problem z manewrowością elektrowni jądrowej pojawia się dopiero po osiągnięciu około 65% wypalenia, a przy 90% wypalenia regulacja jest już niedozwolona. Bloki 858 MW oraz 910 MW posiadają ten sam zakres zmian obciążenia, od 40% do 100%. Wyraźnie widać, że posiadają nieco mniejszą zdolność regulacji niż elektrownia jądrowa z reaktorem AP1000, ale w przeciwieństwie do niej mogą prowadzić tego typu regulacje bez przerwy, nie zważając na stopień wypalenia paliwa.

Elektrownie jądrowe, w tym wyżej opisana, przeznaczone są do pracy przy stałym obciążeniu. Dodatkowo, wedle europejskich wymagań, obecnie budowane elektrownie muszą charakteryzować się współczynnikiem dyspozycyjności wynoszącym minimum 87%. Dyspozycyjność elektrowni z AP1000 wynosi przynajmniej 93% więc spełnia stawiane wymagania. Ponadto projektowany czas życia tej elektrowni wynosi minimum 60 lat, przy czym żywotność zarówno bloku 858 MW jak i 910 MW przewidziana została na 200 tysięcy godzin pracy, czyli nieco ponad 30 lat. Warto tutaj również dodać, że budowa bloku 858 MW trwała 46 miesięcy, zgodnie z zapisami kontraktowymi prace budowlane bloku 910 MW mają potrwać 59 miesięcy, natomiast budowa bloku jądrowego z reaktorem AP1000 trwa (według różnych źródeł) od 54 do 60 miesięcy, a więc podobnie jak jednostki opalanej węglem kamiennym.

W tabelicy 4 przedstawiono ilość zanieczyszczeń produkowanych w przedstawionych blokach energetycznych na MWh oraz ogólną ich ilość uwalnianą do środowiska w ciągu roku.

Jak widać z tabeli 4, największa ilość emitowanego dwutlenku węgla na MWh przypada na blok 858 MW. Niemniej, po obliczeniach uwzględniających moc bloków oraz wskaźniki dyspozycyjności okazuje się, że to blok 910 MW opalany węglem kamiennym będzie emitował największą ilość dwutlenku węgla do środowiska. Blok jądrowy cechuje się praktycznie zerową emisją dwutlenku węgla do atmosfery.

Tabela 4. Emisja zanieczyszczeń [4,6,7]

	BLOK Z AP1000	BLOK 858 MW	BLOK 910 MW
EMISJA:			
PYL	-	0,08 kg/MWh	0,02 kg/MWh
SO ₂	-	0,50 kg/MWh	0,40 kg/MWh
NO _x	-	0,50 kg/MWh	0,40 kg/MWh
CO ₂	0,001 kg/MWh*	750 kg/MWh	692 kg/MWh
ILOŚĆ:			
PYL	-	529 ton/rok	151 ton/rok
SO ₂	-	3307 ton/rok	3029 ton/rok
NO _x	-	3307 ton/rok	3029 ton/rok
CO ₂	9 ton/rok*	4960000 ton/rok	5240000 ton/rok

* uwzględniono emisję dwutlenku węgla podczas budowy bloku jądrowego z reaktorem AP1000

Istotną kwestię stanowią problemy związane z ochroną środowiska. Zarówno elektrownia jądrowa, jak i elektrownie konwencjonalne produkują nie tylko energię elektryczną, ale również odpady. W przypadku elektrowni z AP1000, dzięki dużej wartości wypalenia paliwa udało się ograniczyć ilość odpadów radioaktywnych, przy czym średnia objętość „wyprodukowanych” w elektrowniach jądrowych odpadów stanowi zaledwie 1/10000 objętości odpadów pochodzących z elektrowni węglowych. Ponadto warto zwrócić uwagę, że w elektrowniach konwencjonalnych te odpady rozpraszane są po ogromnym obszarze wraz z spalinami lub są zakopywane tuż pod powierzchnią ziemi. Dodatkowo elektrownie takie nie tylko uwalniają do atmosfery groźne związki chemiczne (tlenki siarki i azotu), ale również są źródłem wprowadzania do środowiska substancji promieniotwórczych. Spalany w komorach spalania węgiel często zawiera niewielkie ilości uranu bądź toru, który w trakcie tego procesu jest uwalniany. W obecnych czasach otoczenie wokół elektrowni konwencjonalnych jest dużo bardziej promieniotwórcze niż otoczenie elektrowni jądrowych.

W elektrowni jądrowej z reaktorem AP1000 w trakcie roku powstaje 54,7 m³ odpadów niskoaktywnych oraz 36,6 m³ odpadów średnioaktywnych, które trafiają do basenu wypalonego paliwa, gdzie przechowywane są przez okres 1-2 lat, gdzie ulegają naturalnej i stopniowej dezaktywacji. Oczywiście po tym czasie nadal wykazują się pewnym stopniem promieniotwórczości, gdyż ulegają ciągłemu rozpadowi. 99% swojej aktywności tracą dopiero po 600 latach, jednak na świecie są tworzone stałe składowiska, które będą mogły pomieścić odpowiednio zabezpieczone materiały [9]. Dla porównania warto dodać, że elektrownia jądrowa Kozłoduj o mocy zainstalowanej 2000 MW w 2010 roku wyprodukowała 1400 t odpadów średnio i wysokoaktywnych [10].

Jednym z głównych powodów przyczyniających się do wyboru pomiędzy energetyką jądrową, a energetyką węglową na parametry nadkrytyczne są rzecz jasna kwestie ekonomiczne. Głównym kosztem, jakie ponosi elektrownia węglowa jest koszt zakupu paliwa. Udział węgla stanowi od 40 do 50% wszystkich kosztów. Zastosowanie zatem wysoce wydajnych i efektywnych bloków na parametry nadkrytyczne obniża ilość wymaganego paliwa przy jednoczesnym zachowaniu mocy wytwórczej. Zastosowanie dużej ilości takich jednostek w przyszłości może doprowadzić do zmniejszenia ceny za wyprodukowaną energię elektryczną. Z drugiej strony tak duży udział paliwa w ponoszonych kosztach powoduje, że koszty wytwarzania energii w tego typu jednostkach są wyjątkowo wrażliwe na ceny węgla. Sytuację odwrotną można zaobserwować natomiast dla elektrowni jądrowej (nie tylko tej opisanej w

pracy), ponieważ cena paliwa w jej przypadku stanowi zaledwie 1% ogólnych kosztów wytwarzania. Szacuje się, że nawet stukrotny wzrost cen uranu na rynku międzynarodowym spowoduje zaledwie podwojenie ceny wyprodukowanej energii elektrycznej. Wysoki koszt eksploatacji elektrowni jądrowej wynika z wysokich nakładów finansowych poczynionych w trakcie inwestycji.

W tabeli 5 znajduje się krótkie zestawienie kosztów związanych z poszczególnymi blokami energetycznymi.

Tabela 5. Podsumowanie ekonomiczne

	BLOK Z AP1000	BLOK 858 MW	BLOK 910 MW
CENA ZA KILOWATOGODZINĘ	11,22-13,09 gr/kWh	14,96 gr/kWh	14,96 gr/kWh
KOSZT BUDOWY	16,5 mld zł	5,06 mld zł	5,4 mld zł
KOSZT W PRZELICZENIU NA MW	0,0150 mld zł/MW 15 000 zł/kW	0,0059 mld zł/MW 5 900 zł/kW	0,0059 mld zł/MW 5 900 zł/kW

Jak widać, koszty energii elektrycznej produkowanej w blokach węglowych na parametry nadkrytyczne są identyczne. Co prawda koszt budowy jednostek nieznacznie się różni, jednak w przeliczeniu tych kosztów na megawaty okazuje się, że są one takie same. W przypadku bloku jądrowego z reaktorem AP1000 można zaobserwować nieco niższą cenę za wyprodukowaną kilowatogodzinę, jednak koszty budowy są tutaj zdecydowanie wyższe. Wyższe są też koszty w przeliczeniu na megawaty (ponad 2,5-krotnie). Taka różnica wynika przede wszystkim z bardzo wysokich kosztów przeznaczonych na zaawansowane systemy bezpieczeństwa, których nie ma w blokach węglowych.

Autorzy: mgr inż. Jakub Sierchula, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jakub.sierchula@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Pawlik M., Strzelczyk F., Elektrownie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2012
- [2] Janiczek R., Eksploatacja elektrowni parowych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992
- [3] Ackermann G., Eksploatacja elektrowni jądrowych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987
- [4] Status report 81 - Advanced Passive PWR (AP 1000), <https://aris.iaea.org/PDF/AP1000.pdf> (stan na 15.06.2015)
- [5] Budowa bloku 910 MW w Elektrowni Jaworzno III, http://energetyka.wnp.pl/dzisz-rozpozecie-budowy-bloku-910-mw-w-elektrowni-jaworzno-iii,234247_1_0_0.html (stan na 4.07.2015)
- [6] Blok energetyczny 858 MW, <http://www.elbelchatow.pgegiek.pl/index.php/blok-energetyczny-858-mw/> (stan na 26.06.2015)
- [7] Blok 910 MW, <http://www.blok910.pl/> (stan na 21.05.2015)
- [8] Doświadczenia z etapu rozruchu i pierwszych tygodni eksploatacji bloku 858 MW w Elektrowni Bełchatów, http://www.redinpe.com/attachments/article/191/lmpe_154-155_art_02.pdf (stan na 26.06.2015)
- [9] AP1000 nuclear power plant design by Westinghouse Electric Company LLC https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/301678/geho0510bskg-e-e.pdf (stan na 10.07.2015)
- [10] Nuclear Power in Bulgaria, <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/Bulgaria/> (stan na 11.07.2015)