

REAKTOR DWUPŁYNOWY JAKO NOWA I REWOLUCYJNA KONCEPCJA REAKTORA JĄDROWEGO

Dual Fluid Reactor as a new and revolutionary concept of a nuclear reactor

Mariusz P. Dąbrowski

Streszczenie: Energetyka jądrowa pomimo swojego znakomitego potencjału dla wytwarzania niezwykle taniej energii elektrycznej, wciąż nie pokonuje innych źródeł w tym aspekcie w jednoznaczny i spektakularny sposób. Problemem są coraz większe wymagania w zakresie bezpieczeństwa, a także oparcie o technologie, których geneza sięga zastosowań militarnych (np. reaktor wodno-ciśnieniowy), i dla których ekonomia nie była priorytetem. Proponowane przez Międzynarodowe Forum Reaktorów IV Generacji (Generation IV International Forum) rozwiązania, chociaż uważane za bezpieczne, wciąż nie wydają się być satysfakcjonującymi pod względem ekonomicznym. Dlatego poszukuje się nowych koncepcji, które mogłyby doprowadzić do spektakularnego przełomu w tej dziedzinie. Taką propozycją jest reaktor dwupłynowy (RD; ang. Dual Fluid Reactor – DFR) opatentowany przez międzynarodową grupę naukowców z prywatnego instytutu badawczego Institute für Festkörper-Kernphysik (IFK) z Berlina. Jest to reaktor z dwoma niezależnymi obiegami: paliwa jądrowego (stopione sole lub ciekły metal) i chłodziwa (ciekły ołów) oddzielonymi poprzez rurki wykonane z węgliku krzemu (SiC), co pozwala na wyjątkową optymalizację jego pracy. W artykule przedstawione są podstawowe cechy tego reaktora jako prędkiego reaktora wysokotemperaturowego (1000°C), samowylączającego się (ujemny współczynnik temperaturowy reaktywności) i niezwykle ekonomicznego. Wyliczony dla tego reaktora Współczynnik Zwrotu Zainwestowanej Energii (WZZE) przewyższa ponad dwudziestokrotnie ten współczynnik dla obecnie pracujących reaktorów II i III generacji i potencjalnie sugeruje, iż ta technologia może okazać się tak przełomową, jak technologia maszyny parowej Jamesa Watta pod koniec XVIII wieku, która doprowadziła do pierwszej rewolucji przemysłowej.

Abstract: Despite its extraordinary potential for producing very cheap energy, the nuclear power still does not defeat in this aspect the other sources in a clear and a spectacular way. The issue is more and more intensive requirements of safety as well as the usage of technologies which are rooted in military applications (e.g. pressurized water reactor) and so the ones for which economy was not the priority. The Generation IV International Forum proposals, in spite of being considered safe, still do not seem to be satisfactory in their economical aspects. This is why one is looking for the new concepts which could lead to a spectacular breakthrough in this field. Such a proposal is the Dual Fluid Reactor (DFR) patented by an international group of scientists from the private research Institute für Festkörper-Kernphysik (IFK) in Berlin. It is a reactor with two independent fluid flows: of the fuel (molten salts or liquid metal), and of the coolant (liquid lead), separated by pipes made of silicon carbide SiC, which allows for extraordinary optimization of its operation. In the paper, the basic features of the reactor as a high-temperature fast reactor (1000°C), with negative temperature coefficient of reactivity, and very economical, are presented. The Energy Return on Invested (EROI) factor calculated for this reactor is more than twenty times larger than that calculated for the II and III generation units, and potentially suggests that this technology can be proven to be as breakthrough as the James' Watt technology of steam engine of the end of 18th century which lead to the first industrial revolution.

Słowa kluczowe: technologie reaktorowe IV generacji; Reaktor dwupłynowy: stopione sole, stopione metale, eutektyki, płynny ołów; Pirochemiczna Jednostka Przetwarzająca; Współczynnik Zwrotu Zainwestowanej Energii

Keywords: IVth generation reactor technologies; Dual Fluid Reactor: molten salts, liquid metals, eutectics, liquid lead; Pirochemical Processing Unit; Energy Return on Invested

Energetyka jądrowa – zrównoważony rozwój, stagnacja, czy przełom?

Militarne źródła powstania cywilnego sektora energetyki jądrowej mają swoje długofalowe konsekwencje, które przede wszystkim objawiają się tym, iż pomimo oczywistego jej potencjału do produkcji energii elektrycznej zdecydowanie tańszej wobec innych źródeł *nie* jest ona postrzegana przez inwestorów biznesowych

jako jednoznacznie bezkonkurencyjna. Pod pojęciem „oczywistego potencjału” rozumie się fakt, iż produkcja energii w przeliczeniu na pojedynczą cząstkę z oddziaływania jądrowego jest ok. sto milionów razy większa niż z reakcji chemicznych (czyli spalania paliw konwencjonalnych), a te z kolei produkują milion razy więcej energii na jedną cząstkę niż elektrownie wykorzystujące oddziaływanie grawitacyjne (np. spadanie wody, wiatr) [1]. Z kolei nieliczne w stosunku do innych form

wytwarzania energii, ale bardzo spektakularne awarie elektrowni jądrowych (Three Mile Island, Czarnobyl, Fukushima), pod wpływem presji społecznej zwiększyły wymagania stawiane przez regulatorów przy budowie nowych jednostek co automatycznie doprowadziło do wyższych kosztów ich budowy i utrzymania. W związku z tym przemysł jądrowy boryka się z określonymi trudnościami ekonomicznymi, co przy dodatkowym wsparciu przez liczne rządy państw dla energetyki odnawialnej stawia go w trudniejszym położeniu niż w początkowej fazie jego rozwoju. Chociaż wiele mówi się o koncepcji zrównoważonego rozwoju sektora energetycznego, co oznacza, iż energetyka powinna opierać się na miksie wielu różnych źródeł, a zatem też jądrowych, to realnie rzecz biorąc nie widać nowych pomysłów w zakresie technologii, które mogłyby zdecydowanie i jednoznacznie zwiększyć wydajność elektrowni jądrowych wobec innych źródeł energii. Niestety, analizując zestaw nowych koncepcji reaktorów jądrowych wymienianych przez Międzynarodowe Forum Reaktorów IV Generacji (GIF – Generation IV International Forum) łatwo zauważamy, że ich prawdziwe korzenie sięgają albo bezpośrednio czasów projektu Manhattan, albo czasów wczesnego okresu zimnej wojny, a więc poszukiwania zastosowań militarnych. Przykładem jest tu koncepcja reaktora wysokotemperaturowego ze złożem usypanym (ang. pebble bed), która pochodzi o Farringtona Daniela i powstała już w 1944 r. [2]. Podobnie koncepcja reaktora na stopionych solach (ang. molten salt reactor) pojawiła się pod koniec lat 40-tych przy okazji pomysłu stworzenia samolotów o napędzie jądrowym [3]. Wydaje się zatem, iż potrzebne są nowe i bardziej przełomowe idee, które pozwoliłyby na skok jakościowy w zakresie przede wszystkim ekonomii produkcji energii z reakcji jądrowych a także, co nie mniej ważne, w zakresie bezpieczeństwa oraz minimalizacji ilości odpadów radioaktywnych. Jedną z takich prób, która wydaje się postulować pewną świeżą logikę w zakresie przede wszystkim ekonomii produkcji energii, a także bezpieczeństwa oraz utylizacji odpadów jest koncepcja Reaktora dwupłynowego znana pod angielskojęzyczną nazwą Dual Fluid Reactor [4].

Reaktor dwupłynowy – Dual Fluid Reactor (DFR): patenty

Na przełomie ostatniego dziesięciolecia (lata 2008-2013) międzynarodowa grupa naukowców skupiona przy prywatnym Instytucie Badawczym IFK – Institute für Festkörper-Kernphysik w Berlinie – prowadzona przez prof. Konrada Czerskiego, opracowała nową koncepcję reaktora jądrowego. Samo opracowanie koncepcji być może nie byłoby czymś nadzwyczajnym, gdyby nie fakt, że ta koncepcja została do dnia dzisiejszego opatentowana lub zgłoszona do opatentowania w co najmniej 40 krajach świata, w tym w Unii Europejskiej, Stanach Zjednoczonych Ameryki, Kanadzie, Indiach, Japonii, Korei Południowej oraz Rosji. Wynalazcy zrobili

to wyłącznie ze środków własnych i do tej pory oprócz patentu na reaktor jądrowy w wersji solnej i metalicznej posiadają też patenty na 3-wymiarową drukarkę dla tworzenia trudno topliwych ceramiek z węgla krzemu (SiC), węgla cyrkonu (ZrC), węgla tytanu (TiC) oraz na Pirochemiczną Jednostkę Przetwarzającą (PJP; ang. Pyrochemical Processing Unit – PPU).

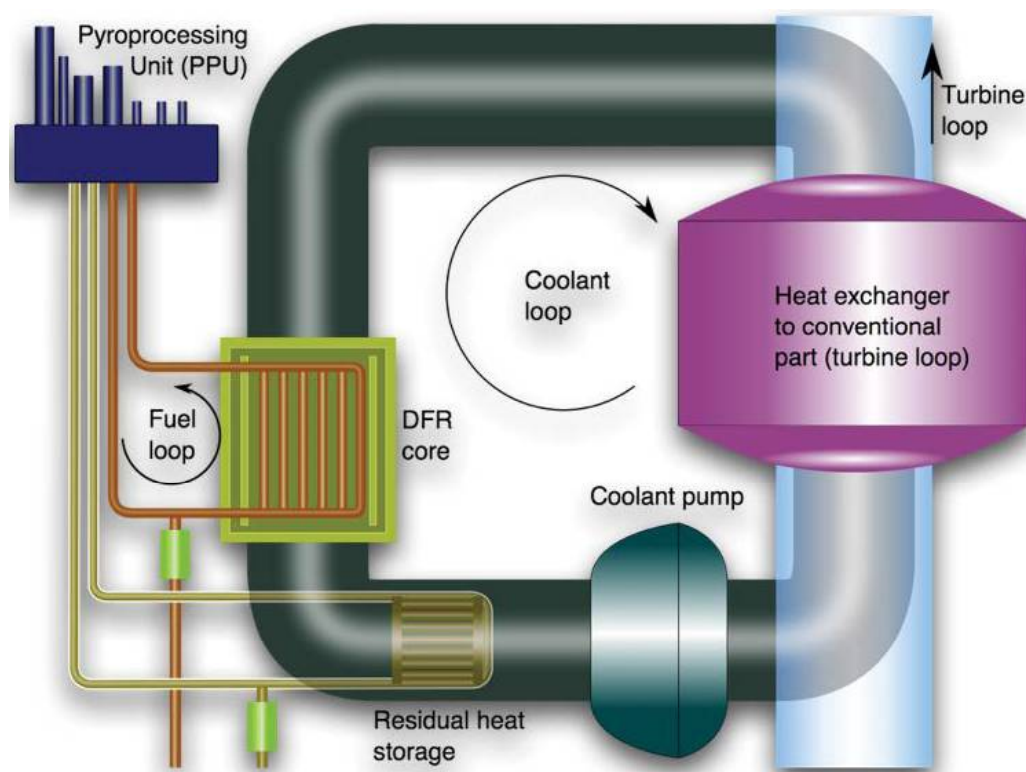
Reaktor dwupłynowy: podstawowe idee

Reaktor dwupłynowy jest nowatorską koncepcją reaktora jądrowego pracującego w bardzo wysokich temperaturach powyżej 1000°C w oparciu o widmo prędkich neutronów [5]. Jego nazwa wzięła się stąd, że istnieją w tym reaktorze dwa oddzielone od siebie obiegi różnych płynów – paliwa i chłodziwa. Ta koncepcja najbardziej przypomina znaną już konfigurację reaktora IV generacji na stopionych solach – Molten Salt Reactor (MSR) – przy czym w odróżnieniu od tej znanej już z lat 40-tych ubiegłego stulecia koncepcji zastosowane są różne płyny oddzielone rurami paliwowymi z żaroodpornego materiału takiego jak np. węgiel krzemu. To pozwala na optymalizację parametrów roboczych paliwa i chłodziwa w sposób niezależny i prowadzi do wyjątkowo wysokiej wydajności tego reaktora o czym napiszę dalej.

Podstawowymi charakterystykami reaktora dwupłynowego są: praca na neutronach prędkich (jest to zatem reaktor prędkie), wysoka temperatura pracy nawet do 1300°C, heterogeniczność (niejednorodność) rdzenia, powielanie paliwa (pluton-239 powstający z uranu-238 lub uran-233 powstający z toru-232), wypalanie odpadów radioaktywnych z innych reaktorów oraz możliwość stałego oddzielania aktywności i innych produktów rozszczepienia w specjalnej Pirochemicznej Jednostce Przetwarzającej. Reaktor dwupłynowy charakteryzuje się bardzo wysoką gęstością mocy oraz podobnie jak MSR pracuje przy ciśnieniu atmosferycznym.

Podstawowy schemat reaktora dwupłynowego przedstawiony jest na rys. 1. Na schemacie widać rdzeń reaktora z pionowymi rurkami wykonanymi z węgla krzemu przez które porusza się z dołu do góry płynne paliwo. Paliwo jest potem kierowane do Pirochemicznej Jednostki Przetwarzającej, aby następnie powrócić do rdzenia. Pomiędzy rurkami z węgla krzemu przepływa chłodziwo także z dołu do góry. Po podgrzaniu w reaktorze chłodziwo przemieszcza się do wymiennika ciepła, w którym produkowana jest wysokotemperaturowa para mogąca być użyta zarówno do wytwarzania energii elektrycznej, jak również wykorzystana w procesach chemicznych. Pod zbiornikiem reaktora znajdują się dwa specjalnie chłodzone „bezpieczniki” („fuses”), które w przypadku przekroczenia granicznej temperatury samoczynnie topią się i pozwalają na natychmiastowe spłynięcie paliwa do umieszczonych pod rdzeniem zbiorników podkrytycznych, gdzie może być odebrane ciepło powyłączeniowe.

Materiały



Rys. 1. Podstawowy schemat reaktora dwupłynowego z dwoma obiegami: paliwa (stopione sole lub ciekły uran) i chłodziwa (ciekły ołów). Po lewej stronie u góry Pirochemiczna Jednostka Przetwarzająca (PPU). Źródło: strona internetowa IFK dual-fluid reactor.org.

Fig. 1. The scheme of the Dual Fluid Reactor with two flows: fuel (molten salts or liquid uranium) and coolant (liquid lead). Upper left: Pyrochemical Processing Unit (PPU). Source: webpage of IFK dual-fluid reactor.org.

Ponieważ reaktor dwupłynowy działa w temperaturze powyżej 1000°C , to jego konstrukcja wymaga odpornych na wysokie temperatury materiałów w postaci stopów metali lub materiałów ceramicznych. Takie materiały są dostępne zarówno w przemyśle jądrowym jak też poza nim. W koncepcji reaktora dwupłynowego rurki, przez które przepływa paliwo o wysokiej temperaturze mają być wykonane z węgla krzemu (SiC). Ten materiał został przetestowany zarówno od strony wytrzymałości mechanicznej jak też wytrzymałości na korozję i silne promieniowanie do temperatury ok. 1600°C . Na rynku dostępne są powszechnie różne części maszyn wykonane z tego materiału. Węgiel krzemu ma także zastosowanie do produkcji paliwa TRISO dla reaktorów wysokotemperaturowych chłodzonych gazem (HTGR) [7]. Najbardziej odpowiednimi elementami wykonanymi z węgla krzemu są rurki o długości ok. 1,0 m, które w jednej z konfiguracji reaktora (DFRm) posiadają wystarczającą długość do konstrukcji rdzenia. Rurki te są produkowane przez General Atomics (GA) jako kompozyty SIGA [8].

Paliwo i chłodziwo

Jeśli chodzi o obiegi paliwa i chłodziwa, to proponowane są jak do tej pory dwie wersje reaktora: tzw. DFRs oraz DFRm. Pierwsza z nich, tak jak w przypad-

ku niektórych wersji reaktora na stopionych solach MSR, używać ma jako paliwa chlorków uranu, toru lub plutonu. Druga ma jako paliwa używać stopionego metalu – tzw. eutektyka, czyli mieszaniny dwóch metali (np. uranu i chromu), która przy odpowiedniej proporcji składników ma o wiele niższą temperaturę topnienia niż każdy z tych metali oddzielnie [6]. Jako chłodziwo ma być używany ciekły ołów. W tym aspekcie reaktor dwupłynowy może być uważany jako rozszerzenie koncepcji innego reaktora IV generacji – reaktora prędkiego chłodzonego ołowiem (Lead-cooled Fast Reactor – LFR), a nawet bardziej ogólnie jako rozszerzenie koncepcji reaktorów chłodzonych ciekłymi metalami (np. też chłodzonego ciekłym sodem – Sodium Fast Reactor (SFR)). Ołów ma stosunkowo niską temperaturę topnienia 327°C , a paruje dopiero w temperaturze 1749°C . Ma mały przekrój czynny na wychwytywanie neutronów prędkich i jednocześnie jest dobrym ich reflektorem. Poza tym praktycznie każdy wzbudzony izotop powstały w wyniku oddziaływania neutronów z ołowiem natychmiast rozpada się na stabilny izotop ołowiu. W końcu ołów charakteryzuje się wysokim współczynnikiem przewodnictwa cieplnego oraz ujemnym współczynnikiem temperaturowym gęstości, co oznacza iż jego gęstość maleje wraz ze wzrostem temperatury. Dlatego też odbiór ciepła może być dodatkowo regulowany przez zwiększanie lub zmniejszanie prędkości przepływu ołowiu, co pozwala także na sterowanie reaktora, do czego wrócimy później. Ponieważ

obieg chłodzący pracuje w wysokiej temperaturze, to nie jest konieczne zastosowanie eutektyki innego metalu z ołowiem jak przy innych koncepcjach reaktorów chłodzonych metalami – ołów w obiegu chłodzącym będzie bowiem pracował powyżej jego temperatury topnienia.

Pirochemiczna Jednostka Przetwarzająca (PPU)

Jednym z istotnych elementów reaktora dwupłynowego, który wzbudza zainteresowanie nawet rządów odchodzących od energetyki jądrowej (np. Niemcy) jest PPU. Jej głównym zadaniem jest atomowa separacja składników użytego paliwa i usuwanie produktów rozpadu jądrowego, co dokonuje się za pomocą wielokrotnej destylacji. Przede wszystkim należy wspomnieć, iż dzięki PPU istnieje możliwość wprowadzenia do obiegu paliwowego, oprócz standardowego paliwa w postaci roztopionego uranu lub toru, także paliwa pozostałe z nie do końca wypalonych elementów paliwowych z reaktorów II i III generacji, a także inne odpady radioaktywne. Z drugiej strony przez odpowiednią destylację chemiczną można wydobyć dzięki PPU różne produkty rozszczepienia, materiał rozszczepialny, a także całkiem sporą ilość radioizotopów do zastosowań medycznych (w tym znacznie przekraczającą obecną ilość światowej produkcji molibdenu-99 podlegającego przemianie na technet-99m).

Możliwe inne zastosowania reaktora dwupłynowego

Wysoka temperatura pracy reaktora, a tym samym wysoka temperatura produkowanej pary rzędu 1000°C, pozwala na wielorakie zastosowania. Przede wszystkim przy wysokiej temperaturze wzrasta sprawność wytwarzania energii elektrycznej, a ciepło odpadowe z takiego procesu o temperaturze ok. 250°C może być dalej wykorzystane np. do odsalania wody morskiej, co jest dodatkową korzyścią ekonomiczną. Ponadto ciepło procesowe o wysokiej temperaturze może być wykorzystane w petrochemii do wytwarzania produktów petrochemicznych. Kolejnym i szeroko pożądanym zastosowaniem może być produkcja wodoru (przy wykorzystaniu wody lub metanu), a w dalszej kolejności produkcja taniego paliwa – np. hydrazyny – do zastosowań w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, także jako ogniwo paliwowych.

Reaktor dwupłynowy - bezpieczeństwo

Najważniejszą cechą bezpieczeństwa reaktora dwupłynowego jest jego duży ujemny współczynnik temperaturowy, co oznacza, iż reaktywność natychmiast maleje w przypadku nawet niewielkiego wzrostu temperatury (na przykład dla jednej z konfiguracji DFRs efektywny współczynnik mnożenia neutronów k spełnia relację $dk/dT = -0,0005/K$). Zatem mamy tu do czynienia z natychmiastową samoczynną (pasywną) reakcją reaktora na wzrost temperatury i w ten sposób regulacją pracy reaktora. Reaktor wykazuje poza tym wiele istot-

nych pasywnych odpowiedzi na wzrost temperatury. Przede wszystkim reaktor posiada normalnie chłodzone, a przy wysokiej temperaturze podlegające stopieniu „bezpieczniki”, które pozwalają spuścić paliwo do zbiorników podkrytycznych znajdujących się pod reaktorem. Tam ciepło powyłączeniowe jest odbierane za pomocą naturalnej konwekcji powietrza. Innymi elementami pasywnego bezpieczeństwa reaktora jest zmniejszanie się liczby aktywności wraz ze zmniejszaniem się gęstości masy paliwa, a także pogorszenie się własności chłodziwa (ołowiu) jako reflektora neutronów przy zmniejszaniu się gęstości masy chłodziwa. Należy także wymienić tzw. efekt Dopplera, czyli wzrost rezonansowego wychwytu neutronów przy wzroście temperatury.

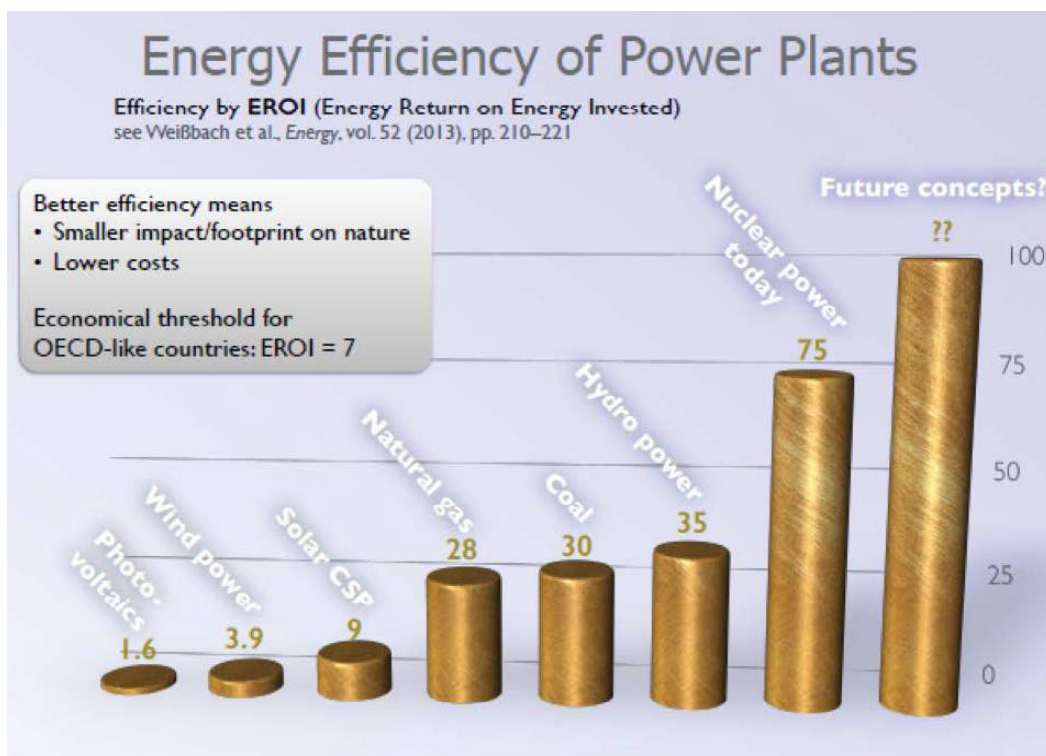
Uruchamianie i zatrzymywanie reaktora, wyłączenie awaryjne

Jedną z ważnych procedur, która jest zupełnie inna niż w reaktorach II i III generacji jest uruchamianie reaktora dwupłynowego do osiągnięcia stanu krytyczności. Aby tego dokonać należy przede wszystkim podgrzać paliwo i chłodziwo w celu osiągnięcia przez nie stanu ciekłego. Następnym krokiem jest wpompowanie paliwa ze znajdujących się pod reaktorem zbiorników podkrytycznych do rdzenia. Krytyczność w wersji DFRs jest osiągana, gdy stopione sole z paliwem osiągną temperaturę równowagi w rdzeniu (ok. 900°C). Wysoki ujemny współczynnik temperaturowy reaktywności nie pozwala na to, aby paliwo wychłodziło się poniżej punktu zestalania się, który jest rzędu 800°C.

Praca reaktora rozpoczyna się niewielką produkcją ciepła. Pompy cyrkulacyjne przyspieszają przepływ chłodziwa (stopionego ołowiu) i rozpoczyna się odbiór ciepła poprzez wymiennik ciepła, co powoduje zmniejszenie temperatury. Reaktor pracuje w stanie nadkrytycznym do czasu osiągnięcia nominalnej temperatury oraz nominalnego poboru mocy. Jeśli pompy cyrkulacyjne spowalniają przepływ chłodziwa to rośnie temperatura w reaktorze i staje się on podkrytyczny. Sterowanie reaktora odbywa się *za pomocą poboru mocy*. Aktywnie można to robić zmieniając prędkość pompowania chłodziwa, natomiast pasywnie za pomocą poboru energii elektrycznej poprzez turbinę generującą prąd.

Wyłączenie reaktora dwupłynowego także wygląda inaczej niż w reaktorach II i III generacji. Przede wszystkim wymagane jest zatrzymanie obiegu chłodziwa. Poprzez zatrzymanie chłodzenia bezpieczników pod rdzeniem następuje opróżnienie obiegu paliwa do zbiorników podkrytycznych. W przypadku dowolnej awarii zwiększającej temperaturę równowagi następuje automatyczne zatrzymanie chłodzenia bezpieczników i spuszczenie paliwa do zbiorników podkrytycznych. Co ciekawe, ta sama procedura jest stosowana dla zwykłego zatrzymania reaktora, jak też dla zatrzymania awaryjnego. Z powyższego wynika, iż *reaktor dwupłynowy nie potrzebuje zastosowania prętów kontrolnych i awaryjnych*.

EROI, czyli Współczynnik Wzrostu Zainwestowanej



Rys. 2. Porównanie efektywności energetycznej różnych źródeł energii na podstawie Współczynnika Zwrotu Zainwestowanej Energii (WZZE lub EROI). Wyliczony WZZE dla elektrowni jądrowych wynosi 75, a na przykład dla elektrowni węglowych tylko 30, ale są to porównywalne rzędy wielkości. Źródło: publikacja [9]

Fig. 2. Plot of energy efficiency for various sources of energy which uses Energy Return on Invested (EROI) ratio. EROI for nuclear plants is 75 while for example for coal plants it is only 30, but the orders of magnitude are still comparable. Source: reference [9]

Energii (WZZE)

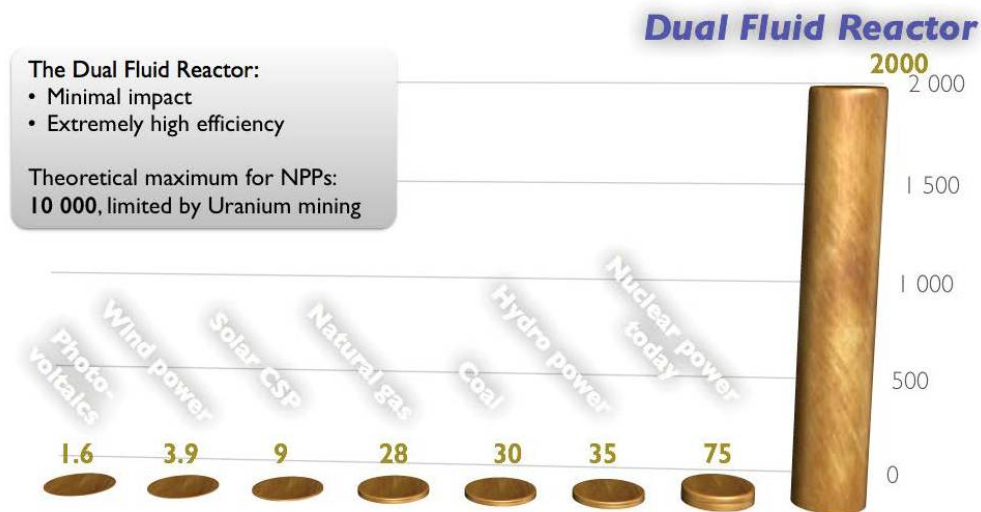
Na cykl produkcyjny energii w obecnych elektrowniach jądrowych składa się wiele procesów takich jak: wydobycie uranu, jego konwersja i wzbogacanie, produkcja elementów paliwowych, utrzymanie elektrowni w ruchu, konstrukcja i likwidacja elektrowni, składowanie odpadów radioaktywnych itp. Stosowany otwarty cykl paliwowy jest kosztowny a do tego tylko 1% paliwa jądrowego z prętów paliwowych podlega wypaleniu pozostawiając 99% niezwytego paliwa do wieloletniego przechowania w składowiskach odpadów. Innym problemem jest mała gęstość mocy reaktorów, co prowadzi do konieczności zużycia dużej ilości drogich materiałów do konstrukcji rdzenia reaktora oraz na zabezpieczenia ze względu na jego duże rozmiary.

W pracy D. Weissbacha i innych [9] grupa wynalazców reaktora dwupłynowego poddała tę koncepcję porównawczej analizie wydajności energetycznej opartej na tzw. Energy Return on Invested (EROI), czyli jak można przetłumaczyć na język polski na Współczynniku Zwrotu Zainwestowanej Energii (WZZE). Ten współczynnik jest definiowany jako stosunek całkowitej energii wyprodukowanej w trakcie całego życia elektrowni do całkowitej energii zużytkowanej na budowę i utrzymanie elektrowni jądrowej włączając w to koszty pośrednie takie jak wydobycie i przetwarzanie paliwa (można te koszty całościowo określić też w przenośni jako

$$EROI = \frac{\text{całkowita energia uzyskana}}{\text{całkowita energia włożona}}$$

W tym momencie należy podkreślić, iż powyżej mamy do czynienia z obliczeniami w terminach energii, a nie w terminach kosztów wyrażonych w formie finansowej co jest definiowane nieco innym współczynnikiem, którego nie będziemy przytaczać ze względu na ograniczoną objętość artykułu. Zgodnie z wyliczeniami opartymi o dane z przemysłu energetycznego dla wielu rodzajów elektrowni, energetyka jądrowa charakteryzowana jest przez WZZE (EROI) na poziomie 75 (rys. 2) wyprzedzając znacznie energetykę opartą o paliwa kopalne (WZZE ok. 30), co jednak niekoniecznie może być satysfakcjonujące biorąc pod uwagę chociażby fakt wypalania tylko 1% paliwa jądrowego z prętów paliwowych. Zaskakujące jest jednak to, iż nowa koncepcja reaktora dwupłynowego w oparciu o te obliczenia może mieć WZZE rzędu 2000 lub więcej (rys. 3). Skąd bierze się tak wysoki współczynnik zwrotu? Po pierwsze, w przypadku DFR nie jest potrzebny cały skomplikowany proces wytwarzania paliwa, a w szczególności jego wzbogacanie – tu wyliczona wydajność zwiększa się z grubszą trzykrotnie. Poza tym większa gęstość energii w rdzeniu reaktora oraz pasywne cechy bezpieczeństwa pozwalają na znaczne zmniejszenie rozmiarów jednostki jądrowej i tym samym na zmniejszenie ilości materiałów potrzebnych do jej konstrukcji – to dalej zwiększa wydajność sześciokrotnie.

Efficiency by EROI (Energy Return on Energy Invested) see Weißbach et al., *Energy*, vol. 52 (2013), pp. 210–221



Rys. 3. To samo co na rys.2, porównanie wydajności energetycznej różnych typów elektrowni względem elektrowni z reaktorem dwupłynowym (DFR). Widać kolosalny skok WZSE – z wartości 75 dla obecnych reaktorów II i III generacji do wartości 2000 dla DFR. Źródło: publikacja [9]

Fig. 3. Same as in Fig. 2 for energy efficiency for various types of sources in comparison with Dual Fluid Reactor (DFR). One notices an extraordinary shift in EROI – from 75 for the current II and III generation plants to the value of 2000 for the DFR. Source: reference [9]

Do tego dochodzą mniejsze koszty utrzymania jednostki w ruchu, mniejsze zużycie paliwa jądrowego, mniejsze koszty składowania odpadów (jest ich tu znacznie mniej i są o wiele bardziej krótkożyłowe) oraz redukcja materiałów żaroodpornych (z 1000 ton dla reaktora lekkowodnego do ok. 100 ton). Należy wspomnieć, że przy wyliczaniu WZSE dla reaktora dwupłynowego brano były pod uwagę koszty konstrukcji, koszty dostarczenia paliwa, koszty utrzymania elektrowni w ruchu oraz koszty jej rozbiórki zgodnie z obowiązującymi kanonami wyliczania kosztów energetyki jądrowej.

Można podać cztery podstawowe powody, które dają tak znaczny postęp w efektywności reaktora dwupłynowego. Przede wszystkim jest to technologia, której początki nie mają korzeni militarnych (produkcja bomby, napęd łodzi podwodnych), tak jak to ma się w przypadku chociażby reaktora wodnociśnieniowego PWR. Po drugie omija się problemy z którymi boryka się generacja III+, dla której wysoce redundantne bezpieczeństwo przeważa nad ekonomią i znacznie zwiększa koszty produkcji energii. Reaktor dwupłynowy posiada także wysoką gęstość energii w rdzeniu, co jest niemożliwe do zastosowania np. w reaktorach wysokotemperaturowych chłodzonych gazem (HTGR), gdzie mała gęstość energii potrzebna jest dla zapobieżenia stopieniu się rdzenia. Reasumując, DFR łączy w sobie dużą gęstość mocy z wysoką wydajnością ekonomiczną ponieważ jest to reaktor na prędkich neutronach - samopowielający, dopuszcza nawet 100% wypalenia, produkuje niewielką ilość odpadów (możliwość transmutacji) i w końcu może wykorzystywać jako paliwa już wypalone pręty z reaktorów II i III generacji.

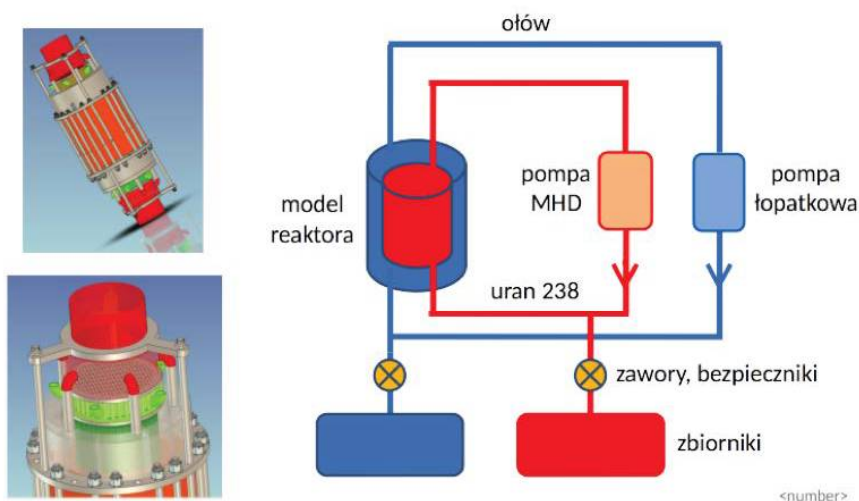
Dokonane przeliczenie wydajności energetycznej na finansowe koszty energii jądrowej z reaktora dwupłynowego

w jego w pracy [9] kształtują się następująco: koszty inwestycji to 1 euro za 1 Wat mocy reaktora, koszt produkcji energii elektrycznej to 0,6 eurocenta za kilowatogodzinę. Do tego dochodzi na przykład możliwość produkcji tanich paliw alternatywnych dla ropy naftowej po cenie 0,3 eurocenta za litr.

Reaktor dwupłynowy a rewolucja przemysłowa Jamesa Watta

Zaskakująco wysoki WZSE (EROI) dla reaktora dwupłynowego według wynalazców wynika z bardzo prostego pomysłu polegającego na rozdzieleniu przepływów (płynnego) paliwa i chłodziwa i wynikającej stąd możliwości niezależnej optymalizacji doboru parametrów tych substancji w celu jak najefektywniejszej pracy reaktora. Ten pomysł można porównać do pomysłu Jamesa Watta z 1765 r. polegający na oddzieleniu układu zbiornika kondensacyjnego i układu cylindra z tłokiem w maszynie parowej Newcomena z 1712 r. Ta ostatnia maszyna miała niezwykle niską sprawność rzędu 0,5-1,0% w związku z czym w praktyce była używana wyłącznie do wypompowywania wody zalewającej kopalnie węgla kamiennego. Nie była zatem konkurencją dla siły pociągowej konia czy też pracy mięśni człowieka, więc nie mogła zastąpić tej pracy z żadnym sektorem ówczesnej gospodarki. Watt był zatrudniony jako asystent na Uniwersytecie w Glasgow i zlecono mu „naprawienie” niewielkiego modelu maszyny Newcomena, która „zatrzymywała się” po kilku cyklach. Po zapoznaniu się z problemem zauważył, iż większość ciepła była w tym modelu zużywana na ogrzanie cylindra z tłokiem i przy małej generowanej energii użytecznej (tzw. egzergii), nie wystarczało jej na wykonanie większej ilości cykli. To skłoniło Watta do

Minidemonstrator bez materiałów promieniotwórczych



Rys. 4. Konceptja zestawu eksperymentalnego (pętli dwupłynowej) tzw. minidemonstratora DFR składającego się z obiegu płynnego zubożonego uranu 238 (symulującego paliwo) oraz ołowiu (symulującego chłodziwo). Obieg jest wymuszany pompą magneto hydrodynamiczną (MHD) dla paliwa oraz zwykłą pompą łopatkową dla chłodziwa. Na dole widać bezpieczniki ulegające stopieniu podczas wyłączenia lub w sytuacjach awaryjnych oraz zbiorniki podkrytyczne. Źródło: K. Czerski - materiały własne

Fig. 4. The concept of experimental unit (dual fluid loops) of the so-called mini-demonstrator DFR composed of flow for depleted uranium 238 (simulating fuel) and flow of lead (simulating coolant). The flow is forced by the magnetohydrodynamic (MHD) pump for the fuel and the ordinary vane pump for the coolant. At the bottom one can see the fuses which melt at shut-down or emergency situations and the subcritical tanks. Source: K. Czerski – private communication

oddzielenia układu kondensacyjnego od układu tłoka i doprowadziło do zwiększenia sprawności urządzenia do 4,0-5,0 %, co dalej poskutkowało zastosowaniem tej maszyny wszędzie tam, gdzie poprzednio była stosowana siła mięśni. Długofalową konsekwencją pomysłu J. Watta była tzw. „rewolucja przemysłowa”. Watt opatentował swój wynalazek w 1769 r. i natychmiast wszedł w partnerstwo przemysłowe z biznesmenem Matthew Boultonem. Mając patent i nową technologię, która nie była dostępna dla innych, uzyskali oni niezwykle profity dla siebie oraz pośrednio dla Wielkiej Brytanii jako kraju, w którym ta technologia pojawiła się po raz pierwszy. Był to tak wielki biznes, iż po wygaśnięciu 20-letniego okresu ochrony patentowej liczni inżynierowie (np. C.R. Trevithick) „oczekiwali w blokach startowych”, aby mogli jeszcze bardziej udoskonalić technologię J. Watta i czerpać kolosalne zyski [10]. W rozważanym przez nas przypadku reaktora dwupłynowego – jeśli oczywiście poprawne jest wyliczenie tak wielkiego Współczynnika Wzrostu Zainwestowanej Energii EROI – możemy się spodziewać kolejnej „rewolucji przemysłowej”; tym razem związanej z przemysłem jądrowym. Rozwiązanie to staje się możliwe ze względu na postęp w technologii obróbki materiałów ceramicznych (np. SiC).

Podsumowanie i perspektywy

Przedstawiona w artykule koncepcja reaktora dwupłynowego, która może być ze względu na istnienie pewnych technologii lub materiałów mogących zło-

żyć się na jego realizację uplasowana na poziomie TRL (Technology Readiness Level) rzędu 2-3 wydaje się być warta dalszych badań i testów laboratoryjnych. Jej zaskakujący potencjał przedstawiony powyżej roztacza wizję kolejnej „rewolucji przemysłowej” tym razem w dziedzinie energetyki jądrowej, która mogłaby całkowicie zmienić oblicze jednej z najważniejszych gałęzi przemysłu, jaką jest energetyka. Oczywiście ta koncepcja pozostawia wiele wyzwań, przede wszystkim w obszarze eksperymentu oraz badań inżynierskich, konstrukcji wstępnych układów laboratoryjnych, reaktora badawczego i/lub demonstratora oraz w końcu prototypu [11, 12]. Jednym z czekających na realizację zestawów eksperymentalnych jest tzw. minidemonstrator DFR (rys. 4), składający się z dwóch pętli z realnym modelem rdzenia reaktora, który tworzą trzy rurki z węgla krzemowego SiC o długości 1 metra. W jednej z pętli ma płynąć ciekły i zubożony uran 238 i jego ruch będzie wymuszany za pomocą pompy magneto hydrodynamicznej MHD. W drugiej ma płynąć ciekły ołów i jego ruch ma być regulowany za pomocą pompy łopatkowej. Pod rdzeniem umieszczone będą bezpieczniki pozwalające na swobodne spuszczenie symulowanego paliwa do zbiorników podkrytycznych. Drugim zestawem eksperymentalnym mogącym służyć do testowania materiałów służących do konstrukcji reaktora dwupłynowego byłby specjalny piec korozyjny dopuszczający temperatury do 1600°C. Wobec powyższego DFR może być traktowany jako koncepcja wymagająca dalszych badań i testów, co zostało m.in.

zarekomendowane w przedstawionym 15 stycznia 2017 r. raporcie zespołu ds. analizy i przygotowania warunków do spraw wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych działającego na zlecenie Ministra Energii i związanego z wdrażaniem Programu Polskiej Energetyki Jądrowej [13].

prof. dr hab. Mariusz P. Dąbrowski
Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk
Uniwersytet Szczeciński, Szczecin

Literatura:

- [1] E. Boeker, R. Grondelle, *Fizyka środowiska*, PWN Warszawa (2003).
- [2] F. Daniels, *Suggestions for a High-Temperature Pebble Pile*. MUC-FD-8; N-1668b, Chicago University Metallurgical Laboratory, Chicago Illinois (1944).
- [3] J. Serp i inni, *The molten-salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives*, Prog. Nucl. Energy 77, 308 (2014).
- [4] www.dual-fluid-reactor.org
- [5] A. Huke, G. Ruprecht, D. Weissbach, S. Gottlieb, A. Hussein, K. Czerski, Ann. Nucl. Energy 80, 225 (2015).
- [6] D.A. Porter, K.E. Easterling, M.Y. Sherif, *Phase Transformations in Metals and Alloys*. CRC Press, Boca Raton (2009).
- [7] G. Longoni, R.O. Gates, B.K. McDowell, *High temperature gas reactors: assessment of applicable codes and standards*, PNNL-20869 Rev. 1, US Nuclear Regulatory Commission (2015).
- [8] www.ga.com/siga-sic-composite
- [9] D. Weissbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlieb, A. Hussein, Energy 52, 210 (2013).
- [10] R.T. Balmer, *Modern Engineering Thermodynamics*, Elsevier Burlington (2011).
- [11] X. Wang, *Analysis and Evaluation of the Dual Fluid Reactor Concept*, rozprawa doktorska, Technische Universität Munich (2017).
- [12] A. Huke i inni, *Dual-fluid reactor*, in: Molten Salt Reactors and Thorium Energy, Thomas J. Dolan (ed.) (Elsevier 2017) s. 619-633.
- [13] Możliwości wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych w Polsce, Raport Zespołu ds. analizy i przygotowania warunków wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych, Ministerstwo Energii, Warszawa, wrzesień 2017; <http://www.me.gov.pl/node/28011>

Znaczący postęp w dziedzinie małych reaktorów modułowych stwierdza MAEA

19 października 2018 (NucNet) Znaczący postęp dokonał się w ostatnich latach w dziedzinie małych reaktorów modułowych (SMR), gdyż ok. 50 koncepcji takich reaktorów znajduje się w różnych stadiach rozwoju na całym świecie, a rozpoczęcie ich eksploatacji oczekiwane jest „w najbliższych latach”, napisano w dokumencie MAEA.

Zgodnie z danymi MAEA, reaktory SMR mogą zapewnić potrzeby energetyczne szerokiego kręgu użytkowników i mogą zastąpić starzejące się bloki opalane paliwami kopalnymi. Charakteryzują się one ulepszonymi cechami bezpieczeństwa i mogą być zastosowane w innych dziedzinach niż produkcja energii elektrycznej, np. takich jak

Konferencja w Pradze na temat energetyki jądrowej w krajach Centralnej i Wschodniej Europy

18 października 2018 (NucNet): Konferencja przemysłu jądrowego w dniach 28-29 stycznia 2019 r. w Pradze (Republika Czeska) poświęcona będzie rozwojowi energetyki jądrowej w krajach Centralnej i Wschodniej Europy — w tym nowym inwestycjom i długoterminowym projektom.

Piąty Kongres Przemysłu Jądrowego Centralnej i Środkowej Europy w 2019 r. zgromadzi delegatów z ponad 15 krajów, podczas którego dyskutowane będą nowe projekty w przemyśle jądrowym, możliwości zawierania kontraktów, zagadnienia finansowe i ryzyko w zarządzaniu oraz sprawy likwidacji obiektów jądrowych i przechowywania odpadów.

Organizatorzy, Grupa SZW (z Chin), przewidują, że w czasie konferencji wygłoszonych zostanie ponad 30 referatów i prezentacji oraz odbędzie się panel dyskusyjny o wyzwaniach w zakresie zaawansowanego cyklu paliwowego, proponowanych innowacjach i zarządzaniu projektami realizowanymi zgodnie z ustalonym harmonogramem i w granicach przewidywanego budżetu.

Na podstawie materiału opublikowanego przez NucNet tłumaczył Andrzej Mikulski,

Polskie Towarzystwo Nukleonicy, Warszawa