

# REALIA I MITY ENERGETYKI JĄDROWEJ

Energetyka jądrowa współtworzyła  
powojenny sukces euroatlantyckiej części świata  
i coś podobnego bardzo przydałoby się teraz.

**Ludwik Pieńkowski**

Wydział Energetyki i Paliw  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**H**istoria energetyki jądrowej zaczyna się z końcem II wojny światowej. Szybkość i rozmach odbudowy uwolnionej części Europy były niesamowite i warto sięgnąć do tamtych wzorców, w tym do pierwszych słów traktatu powołującego Europejską Wspólnotę Energii Atomowej:

*Uznając, że energia jądrowa stanowi zasadnicze źródło rozwoju i ożywienia przemysłu, które umożliwi rozprzestrzenienie idei pokoju [...] strony ustanawiają między sobą Europejską Wspólnotę Energii Atomowej (Euratom).*

Czas zmagania z epidemią COVID-19 zbiegł się z globalnymi procesami związanymi ze zmianami demograficznymi, z postępem technologicznym, zagrożeniami klimatycznymi, rosnącą pozycją Chin i ich rywalizacją z osłabionymi i osamotnionymi Stanami Zjednoczonymi. Czasy, gdy Europa była związana z USA silnym sojuszem, minęły. Dziś Europa szuka równowagi między Chinami i USA oraz akceptuje duży wpływ Rosji na europejską energetykę. Rosną też aspiracje wschodzących gospodarek i ich rywalizację z najsilniejszymi widać też w Europie. Można

postawić tezę, że pragnienie pokonania epidemii może nadać zachodzącym zmianom burzliwy przebieg i kluczowe decyzje będą oparte nie tylko na realiach, lecz także mitach, a historia energetyki jądrowej to również historia mitów.

## Energia

Ikona energetyki jądrowej jest wzór  $E = mc^2$ , sugerujący, że reaktory jądrowe pozwoliły zamieniać masę na energię i z jednego kilograma materii otrzymać tyle dżuli ciepła, co – uwzględniając sprawność cykli termodynamicznych – umożliwi wygenerowanie ponad 8 TWh energii elektrycznej, a tyle może wygenerować elektrownia o mocy 1 GW w ciągu roku. Jednak kilogram materii „zniknie” zarówno w elektrowni jądrowej, jak i węglowej. Elektrownia węglowa w tym celu spali kilka milionów ton węgla dostarczonego przez kilkaset pociągów, z których każdy ma 100 wagonów, a każdy wagon jest wypełniony 60 t węgla. Niemożliwe jest wykrzykie „zniknięcia” kilograma materii po spalaniu milionów ton węgla w milionach ton tlenu. Z kolei elektrownia jądrowa zużyje około 30 t paliwa, rozszczepieniu ulegnie tona jąder uranu i plutonu i z tej tony w bilansie mas „zniknie” jeden kilogram materii, gdyż masa rozszczepiającego się jądra jest większa o jeden promil od sumy mas produktów rozszczepienia. Jest to ilość mierzalna, ale nieistotnie mała, nie ma żadnego wpływu na projekty reaktorów. Należy tu wyjaśnić, że energię rozszczepienia dobrze opisuje elektrostatyczne odpychanie dwóch mniejszych jąder powstających z podziału jądra większego. Rozpędzone



**prof. Ludwik  
Pieńkowski**

Jest profesorem Akademii Górniczo-Hutniczej. Zainicjował w Polsce prace nad wdrożeniem reaktorów jądrowych małej mocy. W latach 2012–2015 był koordynatorem programu „Rozwój wysokotemperaturowych reaktorów do zastosowań przemysłowych (HTRPL)”. Jest autorem ponad 80 prac naukowych.  
pieńkows@agh.edu.pl



jądra hamują w materii głównie przez oddziaływanie z elektronami i ich energia kinetyczna odnajduje się w postaci ciepła. Wiele istotnych szczegółów rozszczepienia opisuje fizyka kwantowa, wyjaśniając m.in., dlaczego tylko nieliczne jądra atomowe, takie jak uran-235 i pluton-239, po schwytaniu neutronu często dzielą się na dwa mniejsze jądra i dlaczego temu zjawisku towarzyszy emisja dwóch albo trzech neutronów, które mogą podtrzymać łańcuch reakcji rozszczepień. Przełomowym momentem dla energetyki było zademonstrowanie, że spalniając neutrony i wyłapując je przez nierozszczepialne izotopy, których ilość w rdzeniu reaktora jest regulowalna, jest możliwe sterowanie liczbą rozszczepień na jednostkę czasu, czyli sterowanie mocą reaktora. Wzór  $E = mc^2$  jest mitem założycielskim energetyki jądrowej, który nie tylko umieścił ją w „relatywistycznej krainie” równoważności masy i energii, przyczynił się do powstania kolejnych mitów, lecz także podkreślił olbrzymią gęstość energii w paliwie reaktorowym.

## Bezpieczeństwo

W debatach o energetyce jądrowej zawsze są rozważane zagrożenia stwarzane przez wypalone paliwo.

Jak pokazano, jego masa jest niewielka w porównaniu do ilości wygenerowanej energii, ale radiotoksyczność wypalonego paliwa spadnie do poziomu radiotoksyczności rudy uranowej dopiero za kilkaset tysięcy lat, co buduje mit o braku możliwości rozwiązania problemu składowania wypalonego paliwa. Jednak jedynie „świeże” wypalone paliwo jest materiałem, który sam z siebie stwarza zagrożenia. Jego składowanie wymaga mocnych, chłodzonych pojemników, gdyż rozpady radioaktywne wytwarzają znaczne ilości ciepła i chemia wypalonego paliwa jest burzliwa. Typowo przez pierwsze co najmniej 10 lat wypalone paliwo jest przechowywane w basenach zlokalizowanych na terenie elektrowni. Z biegiem lat intensywność rozpadów maleje i staje się zbyt mała, by uszkodzić dobrze przygotowane zasobniki. Co więcej, po kilkuset latach w wypalonym paliwie nie będzie już mobilnych radioizotopów takich jak cez-137, którego połowiczny czas rozpadu wynosi 30 lat. Zatem po kilku tysiącach lat ryzyko uwolnienia do środowiska mobilnych radioizotopów wygasa i rozszczelnienie zasobników w wyniku jakiegś pomyłki lub katastrofy nie spowoduje skażeń w odległościach większych niż kilka kilometrów. Wiadomo to z badań pozostałości po naturalnym reaktorze



Oklo (Gabon, środkowa Afryka), który dwa miliardy lat temu samoistnie pracował w złożach rud uranu zalewanych wodą. Zatem wyzwaniem jest budowa bezpiecznego składowiska, które ma przetrwać kilka tysięcy lat, a w dłuższej perspektywie jedynie dawać ochronę przed intencjonalnym wykorzystaniem „staro” wypalonego paliwa w złych zamiarach.

Katastrofy w Three Mile Island, Czarnobylu i Fukushima pokazały, że energetyka jądrowa niesie z sobą zagrożenia, ale podjęte po nich działania wzmocniły jej bezpieczeństwo. W 1979 roku w Three Mile Island (USA) zawiodły procedury bezpieczeństwa, rdzeń reaktora stopił się, ale nie doszło do skażenia otoczenia. Po tej katastrofie wprowadzono pasywne systemy bezpieczeństwa i wzmocniono procedury awaryjne. W 1986 roku w Czarnobylu (ZSRR) reaktor został zniszczony, było wiele ofiar śmiertelnych i doszło do znacznego skażenia środowiska. Z całą siłą odżył wówczas mit o możliwości wybuchu reaktora o sile porównywalnej z wybuchem bomby atomowej. Taki scenariusz jest niemożliwy z wielu powodów, a w praktyce zademonstrowała to katastrofa w Czarnobylu, gdzie na skutek niekontrolowanego wzrostu mocy doszło do wybuchu chemicznego, który zniszczył rdzeń reaktora, eliminując możliwość jego nuklearnego

wybuchu. Analiza przebiegu katastrofy pokazała, że konstrukcja reaktora miała istotne wady, a procedury awaryjne dopuszczały możliwość podjęcia przez operatorów ryzykownych decyzji. Obecnie reaktory z takimi wadami nie mogą być ani budowane, ani eksploatowane. Katastrofa w Fukushimie (Japonia) w 2011 roku pokazała bezradność człowieka w obliczu wielkiej katastrofy naturalnej. Z drugiej strony wielkie tsunami na Oceanie Indyjskim w 2004 roku było jak sygnał alarmowy dla takich elektrowni jak Fukushima. Przez kilka lat czyniono próby przekonania Japonii do lepszego zabezpieczenia elektrowni przed tsunami, ale niestety zaleceń tych wówczas nie wdrożono.

Bez żadnej wątpliwości zapewnienie bezpieczeństwa jest nadrzędnym zadaniem, ale nie może być mitologizowane ani przesłaniać oceny przydatności gospodarczej reaktorów. W przeszłości wielokrotnie podejmowano próby wdrożenia różnych technologii, ale jedynie nieliczne przebiły się do energetyki. Mimo kilku kosztownych prób nie udało się to reaktorom wysokotemperaturowym, prędkim chłodzonym sodem, ołowiem ani reaktorom z ciekłymi solami. Współczesna energetyka jądrowa umożliwia rozszczepienie jedynie kilku procent uranu zgromadzonego w paliwie reaktorowym, co jest zasadniczą

Elektrownia jądrowa  
w Ulju-gun,  
Korea Południowa,  
maj 2020 rok

motywacją do badania możliwości lepszego wykorzystania paliwa. Są również kreślone projekty reaktorów, które będą mogły przetworzyć wypalone paliwo z dzisiejszych elektrowni jądrowych w materiał o mniejszej radiotoksyczności. Dlatego mimo kosztownych porażek co jakiś czas są podejmowane kolejne próby budowy nowatorskich reaktorów, czego przykładem jest budowana w Chinach elektrownia z dwoma reaktorami wysokotemperaturowymi. W Chinach i Rosji działają też demonstracyjne reaktory chłodzone sodem, w USA właśnie podjęto decyzję o budowie testowego reaktora w tej technologii oraz wstępne prace projektowe nad innymi rozwiązaniami. Z drugiej strony Francja, mająca chyba największe doświadczenie w projektowaniu, budowie i eksploatacji reaktorów chłodzonych sodem, niedawno wycofała się z realizacji podobnego projektu. Warto też pamiętać o znaczeniu rozwoju technologii reaktorowych dla zastosowań specjalnych, takich jak budowa jądrowych silników rakietowych, jak kiedyś w amerykańskim programie raketowym Nuclear

Zapewnienie bezpieczeństwa jest nadrzędnym zadaniem, ale nie może być mitologizowane ani przesłaniać oceny przydatności gospodarczej reaktorów.

Engine for Rocket Vehicle Application, a dziś w programie National Strategy for Space Nuclear Power and Propulsion, czy wykorzystanie małych reaktorów w trudno dostępnych regionach tundry, na Syberii, ale i do badań Marsa i Księżyca.

## Koszty i rynek

Po katastrofie w Fukushima dla celów energetycznych są budowane wyłącznie duże, ciśnieniowe reaktory lekkowodne (*pressurized water reactor*, PWR) z blokami energetycznymi o mocy większej niż 1 GW. Wyjątkiem są Indie budujące u siebie bloki energetyczne o mocy 700 MW z reaktorami ciężkowodnymi, ale projekt ten nie wkroczył jeszcze na globalne rynki. Jedynie kilka projektów reaktorów PWR znalazło inwestorów i wszystkie te projekty są do siebie podobne. Z kolei ocena przydatności gospodarczej budowanych elektrowni z tymi reaktorami jest bardzo różna. Od lat widać opóźnienia i rosnące koszty budowy wszystkich elektrowni jądrowych, jednak wzniesienie czterech i już uruchomienie pierwszego koreańskiego reaktora APR-1400 w Zjednoczonych Emiratach Arabskich należy zaliczyć do sukcesów energetyki jądrowej. Porównywalnym sukcesem

kończą się też inwestycje w Korei Południowej z reaktorem APR-1400 oraz wszystkie z rosyjskim WWER-1200 i chińskim Hualong One. W Chinach również dość sprawnie zrealizowano budowę czterech amerykańskich reaktorów AP1000 i dwóch francuskich reaktorów EPR. Z drugiej strony porzucenie budowy dwóch reaktorów AP1000 w elektrowni Virgil C. Summer (USA) to porażka ze stratami sięgającymi 10 mld dolarów. Porażką jest też budowa dwóch reaktorów AP1000 w USA w elektrowni Vogtle Electric Generating Plant, gdyż jej koszt przekracza 25 mld dolarów. Podobnie porażkami są budowy jednego francuskiego reaktora EPR w Finlandii i drugiego we Francji, których opóźnienia są wieloletnie, a koszty wręcz absurdalnie duże. Z kolei wspólnie budowane przez Francję i Chiny dwa reaktory EPR w Wielkiej Brytanii są dziś chyba bliżej sukcesu niż porażki.

Mniejsze reaktory PWR, z blokami energetycznymi o mocy mniejszej niż 1 GW, zostały wyparte z globalnego rynku przez efekt skali, który występuje powszechnie, m.in. na rynku lodówek, gdzie dwie małe lodówki są droższe od jednej dwa razy większej. Efekt skali ma jednak ograniczenia i w energetyce jądrowej pierwsze z nich wynika z technicznych barier przy produkcji dużych i wytrzymałych zbiorników dla reaktorów PWR, a ogólniej – z małego rynku wykonawców kluczowych, kosztownych, ciężkich elementów.

Zbiorniki, w których umieszcza się uranowy rdzeń reaktora, są dziś tak duże, że może je wyprodukować jedynie kilka firm w Japonii, Chinach, Rosji, Korei Południowej i możliwe, że jedna we Francji. Rynek jest płytki, podatny na wpływy i cena realizacji zamówienia może być wysoka. Planując budowę kilku reaktorów (tak jak w Polsce jedynie sześciu), wszystkie zbiorniki należy odebrać w ciągu dwóch, może trzech lat, gdyż typowa linia produkcyjna wytwarza kilka zbiorników rocznie. Zatem optymalizacja realizacji małego programu jest wręcz niemożliwa. Budując bloki jeden po drugim, ostatni odebrany zbiornik (w polskim programie szósty) będzie czekał nawet kilkanaście lat na zainstalowanie. Alternatywą jest równoległa budowa, co dla małego programu jest kosztowne.

Tym samym widać zderzenie efektu skali z głębokością rynku nabywców reaktorów, a pozyskanie zamówienia na budowę 20 i więcej dużych reaktorów nie jest proste. W ostatnich latach udało się to Rosji z reaktorem WWER-1200, zapewne uda się Chinom z reaktorem Hualong One i widać potencjalne możliwości Indii z ich reaktorem ciężkowodnym. Z kolei portfele zamówień na budowę reaktorów AP1000, EPR i APR-1400 od wielu lat są puste. Rosja i Chiny sprawnie budują reaktory dużej mocy, co w Polsce zbudowało mit o sprawdzonych, dostępnych reaktorach dużej mocy, również takich, na które popyt jest zerowy.

Koreańskie reaktory APR-1400 wypadły z rynku, gdy kilka lat temu Korea przyjęła program odchodzenia od atomu. Jest on rozłożony na wiele lat, zakłada

dokończenie budowy czterech reaktorów, ale plany budowy kolejnych zostały zatrzymane.

Wydaje się, że szansę zbudowania dużego rynku nabywców reaktorów AP1000 i EPR utracono kilka lat temu. Przyczyniły się do tego porażki biznesowe oraz strategiczne decyzje Francji i USA sprzed lat. Katastrofa w Fukushima spowolniła energetykę jądrową, jednak już w 2013 roku widać było ożywienie w Chinach i Rosji, a Francja starała się zdobyć nowe zamówienia. Żeby wzmocnić swoją pozycję, zaprosiła Chiny do objęcia jednej trzeciej udziałów w planowanej budowie dwóch reaktorów EPR w elektrowni Hinkley Point C (Wielka Brytania). W Chinach budowano wtedy dwa reaktory EPR (już pracują), a nowa umowa dała im faktyczne zielone światło dla rozwoju projektu reaktora Hualong One, który jest wzorowany na francuskich reaktorach. Dziś Francję i Chiny łączą wspólne inwestycje w Wielkiej Brytanii, co utrudnia zbudowanie rynku nabywców reaktorów EPR, gdyż nie leży to w interesie Chin, które mają swój reaktor Hualong One.

Budowa w Chinach czterech reaktorów AP1000 była flagowym projektem wizji ścisłej współpracy USA i Chin. Reaktory już pracują, ale jeden z nich przez niemal cały 2019 rok był wyłączony z powodu awarii pompy cyrkulacyjnej i wiele wskazuje, że pompy te nadal są słabym punktem projektu AP1000. Amerykanie, podobnie jak Francuzi, poszukiwali wsparcia Chin i w 2013 roku sukcesem ogłoszono zawarcie porozumienia otwierającego Chinom drogę do zdobycia pozycji globalnego dostawcy dla reaktorów AP1000. Równocześnie Chiny uzyskały faktyczne prawo do budowy klonów AP1000 pod nazwą China Advanced Passive 1000, w skrócie CAP1000 i w powiększonej wersji CAP1400. Historia pokazała, że budowy żadnego reaktora AP1000 na chińskich częściach nigdzie nie uruchomiono, a w chińskich planach klony AP1000 są wypierane przez Hualong One.

Obecnie, gdy epidemia COVID-19 nasiliła rywalizację Chin z USA, widać, że decyzje sprzed lat utrudniają zbudowanie rynku nabywców reaktorów AP1000, gdyż w Chinach ich klony nie powstają i to państwo nie będzie globalnym dostawcą części.

Kolejna bariera ekspansji reaktorów dużej mocy wynika z faktu, że ze względu na ich rozmiary budynki dla nich przeznaczone są wznoszone w miarę postępu prac przy budowie reaktorów. Taka organizacja wymusza szeregowe ułożenie wielu czynności, co wydłuża czas realizacji inwestycji i sprzyja lawinowo rosnącym opóźnieniom. Utrudniony jest też podział inwestycji na równoległe ścieżki oraz udział małych i średnich firm.

W świetle pokazanych wad można by wnioskować, że dobrym pomysłem jest budowa mniejszych reaktorów. Jednak doświadczenia firmy Westinghouse Electric Company z projektami AP600 i AP1000 pokazały, że tego typu rozwiązania nie ciszą się popularnością. Westinghouse najpierw przygotował projekt AP600,

przeprowadził w USA proces jego licencjonowania, ale reaktor ten nie znalazł żadnego inwestora. Widząc zainteresowanie większymi reaktorami, firma szybko opracowała reaktor AP1000, który jest niemal prostym powiększeniem AP600, i ten projekt szybko znalazł nabywców. Tuż przed katastrofą w Fukushima było widać szansę na budowę nawet 50 reaktorów w Chinach, USA, Indiach i Wielkiej Brytanii. Jednak dziś zagraniczny rynek przejmuje konkurencja, a w USA po decyzji z sierpnia 2020 roku o wyprzedzący części do dwóch AP1000 zgromadzonych w porzuconej inwestycji Virgil C. Summer z całą pewnością nie ruszy budowa żadnego nowego AP1000.

Wątpliwe, by świat powrócił do mniejszych reaktorów takich jak AP600, ale w naszym programie zamianę sześciu bloków o mocy 1200 MW na 12 mniejszych warto byłoby rozważyć. Z kolei pomysł budowy w Polsce 120 bloków energetycznych, każdy o mocy 60 MW, zawsze będzie nierozsądny. Efekt skali dla 20-krotnie mniejszej mocy bardzo silnie faworyzuje duże reaktory i potrzebne są dobre pomysły, by seryj-

Wątpliwe, by świat powrócił do mniejszych reaktorów takich jak AP600, ale w naszym programie zamianę sześciu bloków o mocy 1200 MW na 12 mniejszych warto rozważyć.

nie produkowane małe reaktory były konkurencyjne. Jednym z nich jest budowa dużych bloków jądrowych składających się nawet z kilkunastu modułów, gdzie z jednej strony każdy będzie zasilany własnym reaktorem małej mocy, z drugiej zaś – wiele systemów będzie wspólnych dla co najmniej kilku modułów. W tej kategorii najbardziej zaawansowany jest projekt firmy NuScale Power w USA. W 2030 roku w Idaho ma ruszyć pierwszy blok o mocy 924 MW składający się z 12 modułów zasilanych zintegrowanymi reaktorami PWR małej mocy. Umieszczenie ich we wspólnym budynku zostało już dopuszczone przez amerykańskiego regulatora, co było możliwe, ponieważ każdy z reaktorów NuScale ma indywidualną obudowę bezpieczeństwa. Widać, że projekt ten ma duży potencjał, a dodatkowo zwiększa go suchy system chłodzenia, zużywający jedynie kilka procent wody pobieranej przez chłodnie kominowe. Najdalej za kilka lat dowiemy się, czy NuScale to kolejny mit energetyki jądrowej, czy też projekt przyciągający inwestorów z miliardowymi portfelami. Albo będzie on realną alternatywą dla rosyjskich i chińskich reaktorów, albo dołączy do mitycznej rodziny sprawdzonych reaktorów PWR dużej mocy, których obecnie nikt oprócz Polski nie chce budować. ■