

Świat fizyki

Podręcznik dla szkół ponadgimnazjalnych

zakres podstawowy

pod redakcją Marii Fiałkowskiej

Kraków 2012



ZamKor

Autorzy

Maria Fiałkowska – rozdziały 1 i 3, Jerzy M. Kreiner – rozdziały 2 i 5,
Marek Godlewski i Szymon Godlewski – rozdział 4, Marek Godlewski, Krzysztof Kozak,
Jadwiga Mazur – aneks

Redakcja merytoryczna

Maria Fiałkowska, Barbara Sagnowska

Wirtualne obserwacje z programem Stellarium (www.fizyka.zamkor.pl)

Waldemar Ogłóza, Adam Blokesz

Redakcja językowa

Agnieszka Kochanowska-Sabljak, Magdalena Puda-Blokesz

Rysunki

Katarzyna Mentel

Projekt układu typograficznego

Michał Kędryna

Redakcja techniczna

Michał Kędryna, Stanisław Sagnowski

„Podręcznik dopuszczony do użytku szkolnego przez ministra właściwego do spraw oświaty i wychowania i wpisany do wykazu podręczników przeznaczonych do kształcenia ogólnego do nauczania fizyki, na podstawie opinii rzeczoznawców: dr. Bogusława Móla, mgr. Waldemara Reńdy, dr Henryki Kaczorowskiej.

Zakres kształcenia: podstawowy.

Etap edukacyjny: IV.

Typ szkoły: szkoły ponadgimnazjalne.

Rok dopuszczenia 2011.”

Numer ewidencyjny w wykazie (numer dopuszczenia): 394/2011



© Copyright by ZamKor P. Sagnowski i Wspólnicy sp. j.

ul. Tetmajera 19, 31-352 Kraków

tel. 12 623 25 20

faks 12 623 25 24

e-mail: zamkor@zamkor.pl

www.zamkor.pl

ISBN 978-83-60793-75-6

Druk i oprawa

P.W. STABIL, tel. 12 410 28 20, 21

Spis treści

1. Grawitacja	7
1.1. Trochę historii, czyli o odkryciach Kopernika, Keplera i o geniuszu Newtona	8
1.2. O Newtonie i prawie powszechnej grawitacji	13
1.3. Spadanie ciał jako skutek oddziaływań grawitacyjnych	19
1.4. O ruchu po okręgu i jego przyczynie	28
1.5. Siła grawitacji jako siła dośrodkowa. III prawo Keplera. Ruchy satelitów	44
1.6. Co to znaczy, że ciało jest w stanie nieważkości?	58
Sprawdź swoją wiedzę	64
2. Astronomia	69
2.1. Jak zmierzono odległości do Księżyca, planet i gwiazd?	70
2.2. Księżyc – nasz naturalny satelita	79
2.3. Świat planet	87
Sprawdź swoją wiedzę	98
3. Fizyka atomowa	101
3.1. Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne	102
3.2. O promieniowaniu ciał, widmach ciągłych i „wizytówkach” pierwiastków, czyli ich widmach liniowych	113
3.3. Model Bohra budowy atomu wodoru	126
Sprawdź swoją wiedzę	144
4. Fizyka jądra	149
4.1. Odkrycie promieniotwórczości. Promieniowanie jądrowe i jego właściwości.	150
4.2. Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią. Działanie promieniowania na organizmy żywe	157
4.3. Doświadczenie Rutherforda. Budowa jądra atomowego	168

4.4. Prawo rozpadu promieniotwórczego. Metoda datowania izotopowego	175
4.5. Energia wiązania. Reakcja rozszczepienia.....	190
4.6. Bomba atomowa, energetyka jądrowa.....	201
4.7. Reakcje jądrowe, Słońce i bomba wodorowa.....	214
Sprawdź swoją wiedzę	224
5. Świat galaktyk	229
5.1. Nasza Galaktyka	230
5.2. Inne galaktyki.....	235
5.3. Prawo Hubble'a	239
5.4. Teoria Wielkiego Wybuchu	242
Sprawdź swoją wiedzę	245
Aneks.....	247
Odpowiedzi do zadań rachunkowych	253
Skorowidz	261

4.6. Bomba atomowa, energetyka jądrowa

Po zapoznaniu się z treścią tego paragrafu potrafisz:

- Opisać budowę i zasadę działania bomby atomowej.
- Opisać budowę i zasadę działania reaktora jądrowego.
- Opisać działanie elektrowni atomowej.
- Wymienić korzyści i zagrożenia płynące z energetyki jądrowej.

Wkrótce po odkryciu rozszczepienia jąder uranu uzmysłowiono sobie, że reakcje łańcuchowe mogą być źródłem energii. Początek prac nad wykorzystaniem energii uwalnianej w procesach rozszczepienia przypadł na okres bezpośrednio poprzedzający wybuch II wojny światowej. Z tego względu największej uwagi poświęcono początkowo zastosowaniom militarnym – konstrukcji broni jądrowej.

Bomba atomowa

Zastanówmy się, co by się stało, gdyby udało nam się wytworzyć na tyle dużą kulę zbudowaną z uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$, że większość neutronów uwalnianych w kolejnych rozszczepieniach, jeszcze przed wydostaniem się z niej, zderzyłaby się z atomami uranu, doprowadzając do następnych rozszczepień. Tak się stanie, jeżeli masa kuli przekroczy masę krytyczną. Reakcja łańcuchowa rozwija się wtedy lawinowo, w sposób niekontrolowany. Rozszczepienie ogromnej liczby jąder uranu w bardzo krótkim czasie powoduje wydzielenie takiej energii jak podczas wybuchu setek tysięcy ton trotylu (w wyniku wybuchu 1 tony trotylu wydziela się około $4,2 \cdot 10^9$ J energii).

Uzupełnienie

Jak charakteryzuje się „moc” bomby atomowej?

Bomby atomowe charakteryzuje się, podając masę trotylu potrzebnego do wywołania równoważnego wybuchu. Określenie „bomba o mocy 100 kiloton” oznacza, że wybuch bomby jest równoważny wybuchowi 100 000 ton trotylu (zwróć uwagę na zwyczajowe, choć z punktu

widzenia fizyki niepoprawne, używanie w takiej sytuacji słowa *moc*). Bomba zrzucona w sierpniu 1945 roku na Hiroszimę miała moc 15 kiloton (kt).

Objętość zawartego w niej uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$ była porównywalna z objętością kuli do gry w kręgle. Do przewiezienia 15 tys. ton trotylu potrzeba 1500 ciężarówek, każda o ładowności 10 ton.

W rzeczywistości energia wyzwalana podczas rozwijania się reakcji łańcuchowej szybko doprowadziłaby do rozpadu kuli uranowej na wiele części, które byłyby za małe do podtrzymania reakcji. W rezultacie rozszczepieniu uległaby tylko niewielka część uranu i energia uzyskana podczas wybuchu nie byłaby duża. Bombę trzeba więc tak skonstruować, by jak największa ilość materiału uległa rozszczepieniu w niekontrolowanej, gwałtownej reakcji łańcuchowej, zanim bomba rozpadnie się na fragmenty, a jednocześnie tak, by można było ją bezpiecznie przechowywać i przewozić.



Rys. 4.28

Wybuch bomby Grable o mocy 15 kt w 1953 r.
na poligonie w stanie Nevada (USA)

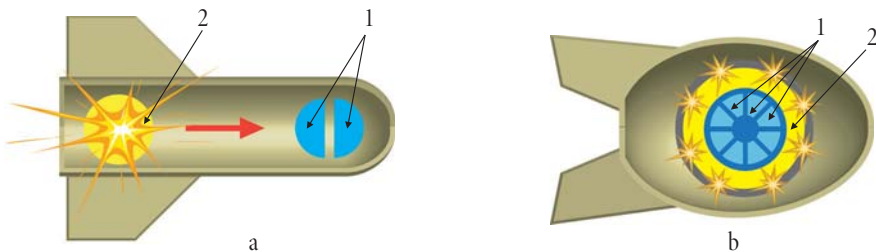
Materiał rozszczepialny zawarty w bombie (${}_{92}^{235}\text{U}$ lub ${}_{94}^{239}\text{Pu}$) jest podzielony na kilka oddalonych od siebie fragmentów. Masa każdej z tych części jest mniejsza od masy krytycznej, więc nie może się w nich rozwinąć reakcja łańcuchowa. Zabezpiecza to przed przedwczesnym, niezamierzonym wybuchem bomby i umożliwia

jej przechowywanie oraz transport. Obok fragmentów zbudowanych z materiału rozszczepialnego, tworzącego tzw. ładunek nuklearny, w bombie znajduje się również konwencjonalny ładunek wybuchowy (np. trotyl), który pełni rolę zapalnika. Jego detonacja prowadzi do szybkiego ściśnięcia i połączenia ze sobą fragmentów ładunku nuklearnego, a w konsekwencji do przekroczenia masy krytycznej, co umożliwia zajście reakcji łańcuchowej i wybuch bomby.

Uzupełnienie

O konstrukcji bomb atomowych.

W praktyce stosuje się dwa rodzaje konstrukcji bomb atomowych. Konstrukcja pierwszego rodzaju to tzw. **konstrukcja działa** przedstawiona schematycznie na rysunku 4.29a. Bomba składa się z dwóch oddalonych od siebie fragmentów zbudowanych z materiału rozszczepialnego (1), którym jest wysoko wzbogacony uran (o zawartości ponad 90% izotopu $^{235}_{92}\text{U}$) oraz konwencjonalnego ładunku wybuchowego (trotylu) pełniącego rolę zapalnika (2). Masy obu części uranowych są mniejsze niż masa krytyczna i dlatego nie może w nich rozwinąć się reakcja łańcuchowa. Detonacja zapalnika prowadzi do wystrzelenia jednego z fragmentów ładunku nuklearnego w kierunku drugiego (stąd pochodzi nazwa – konstrukcja działa). Następuje połączenie ładunków uranowych, co prowadzi do przekroczenia masy krytycznej i eksplozji jądrowej.



Rys. 4.29

Podstawą budowy drugiego rodzaju bomby (rys. 4.29b) jest konstrukcja implozyjna. Ładunek nuklearny składający się z wielu fragmentów (1) zbudowanych z plutonu ($^{239}_{94}\text{Pu}$), z których każdy ma masę mniejszą od masy krytycznej, tworzy tzw. rdzeń umieszczony w otoczkę z konwencjonalnego ładunku wybuchowego (2) stanowiącego zapalnik. Detonacja otoczki prowadzi do gwałtownego wzrostu ciśnienia wywieranego na rdzeń plutonowy, jego ściśnięcia i połączenia fragmentów ze sobą (stąd wywodzi się nazwa konstrukcji implozyjnej). Następuje przekroczenie masy krytycznej i wybuch jądrowy. Bomba taka zapewnia większą energię wybuchu i jest lepiej zabezpieczona przed niezamierzoną eksplozją niż bomba o konstrukcji działa, ale jej zbudowanie nie należy do łatwych.

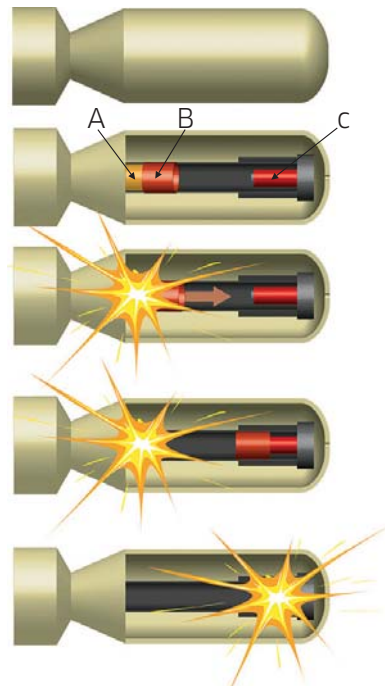
Maksymalna energia wydzielana podczas eksplozji bomby atomowej jest jednak ograniczona, gdyż ilość materiału nuklearnego, który ulega rozszczepieniu, zanim bomba rozpadnie się na fragmenty, nie może być dowolnie duża. Szacuje się, że

energia wybuchu najpotężniejszych bomb atomowych odpowiada wybuchowi maksymalnie około 500 000 ton trotylu.

Uzupełnienie

Pierwsze bomby atomowe

Pierwszy próbny wybuch bomby atomowej przeprowadzono w USA w lipcu 1945 roku. Miesiąc później dwie bomby atomowe zostały użyte przeciwko Japonii. Bomba *Little Boy* zrzucona na japońskie miasto Hiroszima była bombą uranową. Druga, nazwana *Fat Man*, której wybuch nastąpił nad miastem Nagasaki, zawierała pluton. Bomby te były jedynymi bombami atomowymi wykorzystanymi w konfliktach zbrojnych. Doprowadziły one do bezpośredniej śmierci około dwustu tysięcy ludzi. Pośrednie skutki wybuchu w postaci zapadalności ludzi na różne choroby spowodowane działaniem promieniowania jonizującego odczuwano przez wiele lat. Na rysunku 4.30 został przedstawiony schemat bomby *Little Boy*. Obecnie kilkanaście tysięcy bomb i głowic nuklearnych do rakiet posiadają łącznie: USA, Rosja, Wielka Brytania, Francja, Chiny, Indie, Pakistan i Korea Północna oraz prawdopodobnie Izrael. W wyniku różnych wypadków przypuszczalnie 51 bomb i głowic nuklearnych zostało zgubionych w głębinach morskich.



Rys. 4.30

A – ładunek konwencjonalny, którego wybuch powodował wystrzelenie cylindra B zrobionego z uranu. Nasuwał się on na walec uranowy C. Masa połączonych części B i C przekraczała masę krytyczną uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Energetyka jądrowa

Bezpośrednio po zakończeniu II wojny światowej rozpoczęto prace nad możliwościami cywilnego zastosowania kontrolowanych reakcji jądrowych. W efekcie tego w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku powstały pierwsze elektrownie jądrowe. **Elektrownie jądrowe**, podobnie jak elektrownie węglowe, należą do tzw. elektrowni ciepłych, w których energia elektryczna jest wytwarzana w turbinach napędzanych

parą wodną. Różnica polega na sposobie wytwarzania pary pod wysokim ciśnieniem, wprawiającej w ruch łopatkę turbin. W elektrowniach jądrowych w miejsce klasycznego kotła opalanego np. węglem zastosowano reaktor jądrowy.

Reaktor jądrowy

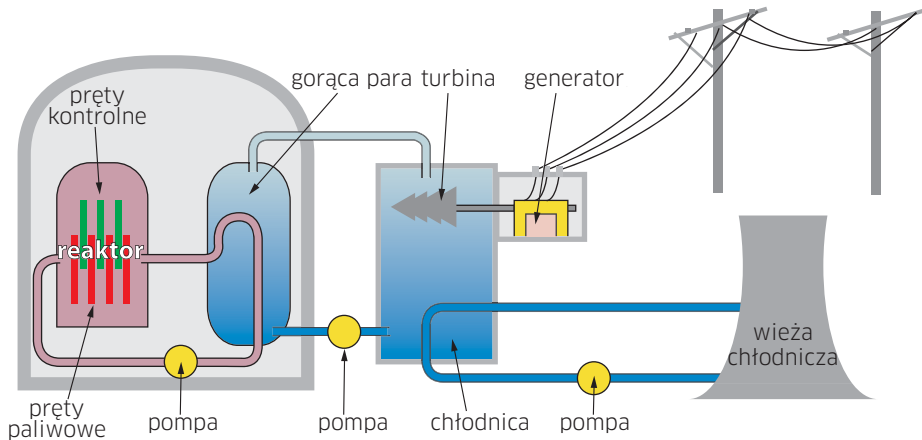
W reaktorach jądrowych jako paliwo najczęściej jest stosowany uran. Znajduje się on wewnątrz reaktora w postaci **prętów paliwowych**, w których zachodzi kontrolowana reakcja łańcuchowa. Liczba i wielkość prętów paliwowych zależą od mocy reaktora. W przeciętnym reaktorze jest ich kilkaset.

Z uwagi na zbyt małą, niepozwalającą na podtrzymanie reakcji łańcuchowej zawartość rozszczepialnego ${}^{235}_{92}\text{U}$ (około 0,7%) w naturalnych rudach uranu w procesie przygotowania paliwa jądrowego wzbogaca się uran, zwiększając w nim zawartość ${}^{235}_{92}\text{U}$ do około 3–5%. Wystarcza to do wywołania samopodtrzymującej się, kontrolowanej reakcji łańcuchowej.

W procesach rozszczepienia jąder ${}^{235}_{92}\text{U}$ zachodzących w reaktorze są emitowane neutrony, które mają dużą energię kinetyczną. Prawdopodobieństwo wywołania kolejnej reakcji rozszczepienia przez takie neutrony jest niewielkie. Znacznie większe jest dla neutronów o małej energii (zwanym neutronami termicznymi, gdyż ich energia jest porównywalna z energią cząsteczek gazu w temperaturze pokojowej). Pomiędzy prętami paliwowymi umieszcza się więc substancję zwaną **moderato-rem**, której zadanie polega na spowolnieniu szybkich neutronów (zmniejszeniu ich energii kinetycznej). W najbardziej rozpowszechnionych typach reaktorów moderatorem jest woda, która jednocześnie chłodzi reaktor. Moderatorem może być też np. grafit lub beryl. Liczbę neutronów wywołujących rozszczepienia kontroluje się za pomocą **prętów sterujących**, które zawierają substancje dobrze pochłaniające neutrony (np. kadm lub bor) i są wsuwane pomiędzy pręty paliwowe. Dodatkowo nad prętami paliwowymi umieszcza się **pręty bezpieczeństwa**. W sytuacji grożącej przegrzaniem reaktora są one wpuszczane pomiędzy pręty paliwowe, pochłaniają neutrony i reakcja łańcuchowa zostaje przerwana.

Cały reaktor jest obudowany maszyną osłoną stalowo-betonową zapobiegającą wydostawaniu się na zewnątrz promieniowania oraz radioaktywnych produktów reakcji rozszczepienia.

Jądra powstające w wyniku reakcji rozszczepienia mają dużą energię kinetyczną. Przekazując ją otoczeniu, powodują wzrost temperatury wewnątrz reaktora. Pręty sterujące umożliwiają regulację liczby zachodzących reakcji rozszczepień, a więc i ilości wydzielanej w reaktorze energii. Energię tę odprowadza z reaktora substancja chłodząca, którą w ponad 80% elektrowni jądrowych na świecie jest woda. W większości elektrowni obieg wody (pary wodnej) mającej bezpośredni kontakt z reaktorem jest obiegiem zamkniętym, co w przypadku awarii i przedostania się substancji radioaktywnych z paliwa jądrowego do wody zapobiega wydostaniu się ich na zewnątrz. W wymienniku ciepła woda ta przekazuje energię wodzie z obiegu wtórnego, która wrze i jako para jest kierowana do turbiny napędzającej generator (rys. 4.31).



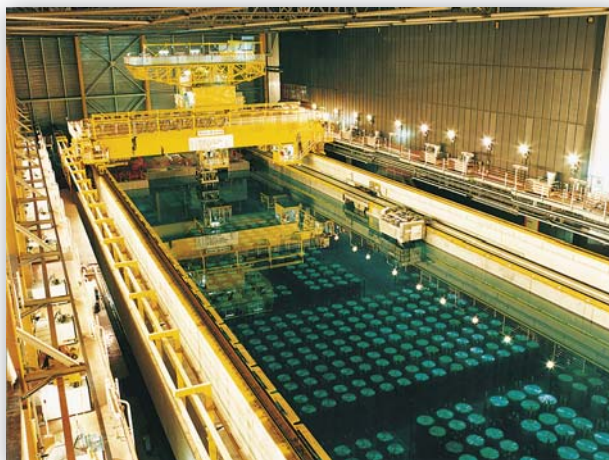
Rys. 4.31



Rys. 4.32

Elektrownia jądrowa. Widoczne budynki reaktorów oraz pióropuszcze pary nad chłodniami kominowymi

Zużyte paliwo jądrowe zawiera wiele silnie radioaktywnych składników. Przechowuje się je w specjalny sposób, by nie dopuścić do skażenia otoczenia. Najpierw przez kilka lat paliwo jest chłodzone w basenach wodnych⁹ (rys. 4.33), a następnie zatapia się je w specjalnych pastylkach szklanych i zamyka w pojemnikach pochłaniających promieniowanie.



Rys. 4.33

Tak przygotowane odpady przechowuje się na przykład w komorach głęboko pod powierzchnią Ziemi. Obecnie coraz częściej zużyte pręty paliwowe są przetwarzane w procesach recyklingu, podczas których odzyskuje się duże ilości materiału ponownie wykorzystywanego do produkcji paliwa jądrowego.

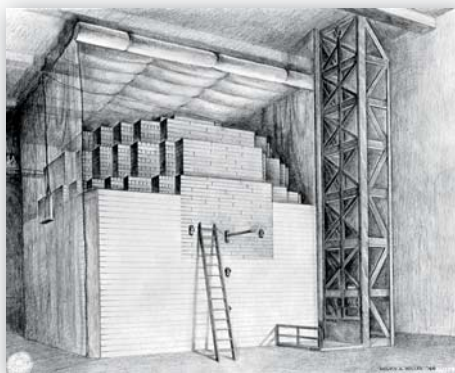
Ciekawostka

Około 2 miliardów lat temu istniał na Ziemi naturalny reaktor jądrowy. Znajdował się w Oklo w Afryce na obszarze obecnego Gabonu. Ukształtowanie terenu powodowało, że ruda uranu wypełniająca niszę o soczewkowatym kształcie była zalewana wodą deszczową, która pełniła rolę moderatora. Umożliwiało to zachodzenie reakcji łańcuchowej. W czasie gdy reaktor był aktywny, woda nagrzewała się, zmieniała w parę wodną i wydostawała na zewnątrz złoża uranu. Wtedy reakcja łańcuchowa zanikała i reaktor się „wylączył”. Następny cykl rozpoczynał się, gdy po opadach znowu zgromadziła się odpowiednia ilość wody. Reaktor działał przez około 150 tysięcy lat. Przez ten czas reakcji rozszczepienia uległo, jak szacują naukowcy, około 6 ton uranu $^{235}_{92}\text{U}$. Średnia moc tego reaktora nie przekraczała 100 kW.

⁹ W 2011 roku trzęsienie ziemi i fala tsunami zniszczyły układ chłodzenia takiego basenu znajdującego się na terenie japońskiej elektrowni Fukushima, co stało się poważnym problemem dla służb ratunkowych starających się nie dopuścić do radioaktywnego skażenia obszarów wokół elektrowni.

Ciekawostka

Pierwszy reaktor atomowy został zbudowany w 1942 roku w Chicago przez zespół fizyków kierowany przez Enrico Fermiego w ramach projektu *Manhattan* (rys. 4.34). Nazywany był wtedy stosem atomowym (po raz pierwszy terminu „reaktor jądrowy” użyto w 1952 roku). Znajdował się w sali pod trybunami stadionu Uniwersytetu w Chicago. Uran (36,5 ton tlenku uranu i 5,6 tony metalicznego uranu) był umieszczony pomiędzy grafitowymi cegłami, które tworzyły kopiec o szerokości ok.



Rys. 4.34

7,5 metra i wysokości ok. 6 metrów składający się z 350 ton grafitu. Kontrolowanie reakcji łańcuchowej odbywało się poprzez wysuwanie i wsuwanie kadmowych prętów w kanały znajdujące się w graficie.

Reaktor miał dwa systemy bezpieczeństwa. Funkcję jednego z nich pełnił człowiek zaopatrzony w siekiere. W razie niebezpieczeństwa przecinał sznur, na którym wisiały pręty kadmowe. Te opadały do kanałów w grafitowych cegłach, kadm pochłaniał neutrony i reakcja łańcuchowa mogła być zatrzymana. Drugim systemem bezpieczeństwa była grupa ludzi stojących na rusztowaniu na szczycie kopca grafitu. Zaopatrzeni w wiadra z wodnym roztworem soli kadmu w sytuacji awaryjnej mogli go wylać na stos. Taki roztwór silnie pochłania neutrony, prowadząc do zatrzymania reakcji łańcuchowej.

Reaktor miał moc 0,5 W i tylko raz (12 grudnia 1942) jego chwilową moc oceniono na 200 W.

Uzupełnienie

Czy elektrownie jądrowe są niebezpieczne?

Wykorzystanie elektrowni jądrowych jako źródła energii budzi ciągle szereg obaw. Są one w głównej mierze efektami awarii w 1986 roku elektrowni jądrowej w Czarnobylu w dawnym Związku Radzieckim. Zahamowała ona na wiele lat budowę elektrowni jądrowych w wielu krajach, w niektórych (jak np. we Włoszech) zamknięto już działające. Obecnie ponownie obserwuje się wzrost zainteresowania elektrowniami jądrowymi. W fazie budowy jest kilkadziesiąt reaktorów na całym świecie, planuje się budowę kolejnych. Warto podkreślić, że awaria podobna do tej, która wydarzyła się w Czarnobylu, nie może mieć miejsca w elektrowniach konstruowanych jedynie dla cywilnych potrzeb. Zagrożenie niosą elektrownie, których reaktory są wykorzystywane również w celach militarnych. Podczas pracy reaktora w prętach uranowych dochodzi do powstawania plutonu. Jednak aby mógł on być wykorzystany w produkcji broni jądrowej, paliwo jądrowe musi być wymieniane co kilkadziesiąt dni. Z tego powodu konstrukcja „militarnych” elektrowni różni się od tych służących jedynie celom cywilnej energetyki. W tych ostatnich wymiana prętów paliwowych następuje co kilka lat i pociąga za sobą konieczność czasowego wyłączenia elektrowni. Elektrownia w Czarnobylu należała do typu „militarnego”.

Takich elektrowni, jak w Czarnobylu nie zbudowano nigdzie poza granicami Związku Radzieckiego. W reaktorach tej elektrowni moderatorem był grafit, natomiast czynnikiem chłodzącym woda. Konstrukcja taka jest niebezpieczna, gdyż awaria układu chłodzenia może prowadzić do przegrzania reaktora i zapalenia się prętów grafitowych. Skutkiem jest pożar elektrowni grożący wydostaniem się silnie radioaktywnych zanieczyszczeń do atmosfery i rozprzestrzenieniem ich na szeroką skalę. Stało się tak w Czarnobylu w wyniku błędu pracowników obsługujących reaktor. Podobna sytuacja nie może się zdarzyć w elektrowniach, w których woda chłodząca jest równocześnie moderatorem. Nadmierne podgrzanie reaktora i wyparowanie wody prowadzi do przerwania reakcji łańcuchowej, gdyż para wodna nie pełni roli moderatora. Warto zaznaczyć, że nawet tak poważna awaria jak w Czarnobylu nie doprowadziłaby do radioaktywnego skażenia na dużą skalę, gdyby reaktor był wyposażony w dostatecznie grubą osłonę żelbetową, której w radzieckiej konstrukcji brakowało. O bezpieczeństwie cywilnych elektrowni świadczy druga z poważnych awarii, jaka miała miejsce w Three Miles Island w USA w 1979 roku. W wyniku przegrzania reaktora doszło tam do stopienia rdzenia reaktora, ale prawidłowo skonstruowana osłona zapobiegła radioaktywnemu skażeniu środowiska.

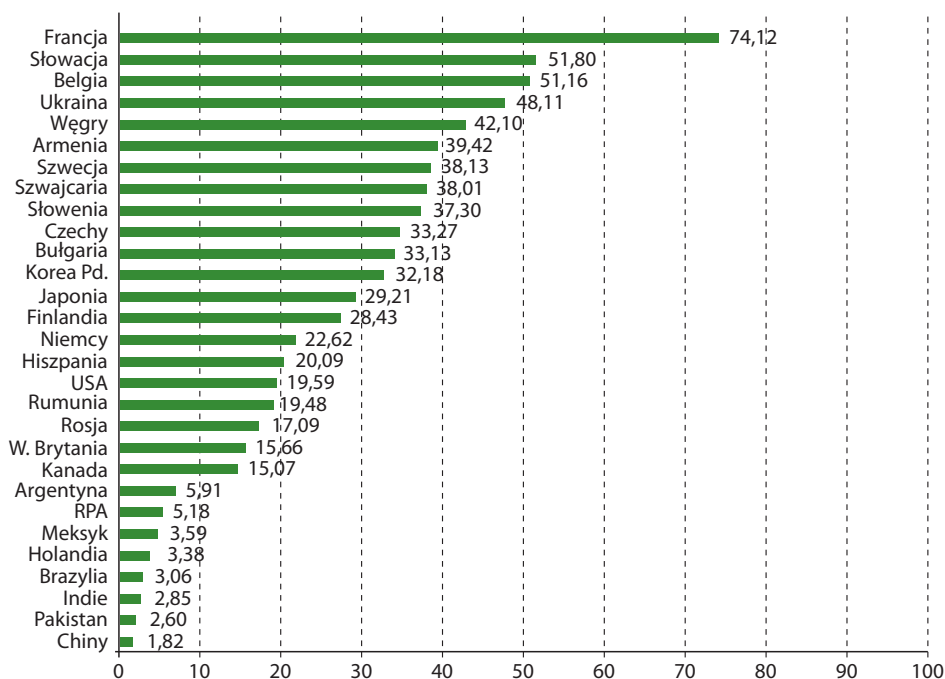
Sporo obaw budzi obecność radioaktywnych substancji w elektrowniach jądrowych. Podczas normalnej pracy prawidłowo skonstruowane i wybudowane elektrownie jądrowe nie powodują radioaktywnego skażenia otoczenia. Okazuje się nawet, że promieniowanie wokół elektrowni węglowych pochodzące z wyrzucanych do atmosfery pyłów (zawierają one pewne ilości naturalnych substancji promieniotwórczych) może być większe od promieniowania wokół nowoczesnej elektrowni jądrowej. Warto przy tym pamiętać, że elektrownie jądrowe nie powodują emisji do atmosfery toksycznych związków, takich jak tlenki węgla, siarki i azotu, wytwarzanych w olbrzymich ilościach w konwencjonalnych elektrowniach węglowych. Najbardziej narażony na wpływ promieniowania jonizującego jest personel elektrowni pracujący wewnątrz bloków reaktorów. Dawka promieniowania pochłanianego przez osoby obsługujące reaktory jest porównywalna z dawką otrzymywaną przez pilotów samolotów pasażerskich podczas lotów na dużych wysokościach. Elektrownie jądrowe konstruuje się tak, by zminimalizować ryzyko wystąpienia skażenia radioaktywnego w przypadku awarii. Temu celowi służą zarówno czynne systemy bezpieczeństwa (np. wymuszone pompami awaryjne chłodzenie reaktora, wpuszczane do reaktora pręty bezpieczeństwa przerywające reakcję łańcuchową), jak i systemy bierne, niewymagające zasilania ani ingerencji personelu (pręty bezpieczeństwa wpadające do reaktora pod wpływem siły grawitacji, żelbetowe obudowy bezpieczeństwa, chłodzenie reaktora, w którym obieg wody wymusza siła grawitacji itp.). Nie jest jednak możliwe pełne zabezpieczenie przed wszystkimi rodzajami katastrof.

Uzupełnienie

O awariach elektrowni jądrowych.

Największe zagrożenie niosą ze sobą katastrofy naturalne, takie jak: trzęsienia ziemi, fale tsunami, pożary, a także ataki terrorystyczne. W 2011 roku miała miejsce bardzo poważna awaria elektrowni jądrowej Fukushima w Japonii w następstwie fali tsunami wywołanej silnym trzęsieniem ziemi. W jej efekcie doszło do częściowego skażenia środowiska, jednak o zdecydowanie mniejszym zasięgu i skali niż w przypadku awarii w Czarnobylu. Warto wspomnieć, że elektrownia Fukushima należała do stosunkowo starych elektrowni. Obecnie budowane są wyposażone w znacznie skuteczniejsze mechanizmy zabezpieczające.

Wiele osób obawia się elektrowni jądrowych, utożsamiając reaktory z bombami atomowymi. Niemożliwy jest wybuch reaktora analogiczny do wybuchu bomby atomowej. W zastosowaniach militarnych wykorzystuje się uran wzbogacony w ponad 90 procentach, natomiast w elektrowniach zawartość $^{235}_{92}\text{U}$ nie przekracza 5% i nie jest wystarczająca do rozwinięcia lawinowej reakcji łańcuchowej powodującej niekontrolowany wybuch.



Rys. 4.35

Udział energii jądrowej (EJ) w produkcji energii elektrycznej (%) w różnych krajach w 2010 r.

Obecnie na świecie około 14% energii elektrycznej pochodzi z 441 czynnych reaktorów jądrowych pracujących w 29 państwach (dane z sierpnia 2010). Reaktory jądrowe mają największy udział w produkcji energii w państwach wysoko rozwiniętych. Udział elektrowni jądrowych w produkcji energii w Azji, Afryce i Ameryce Południowej jest znacznie mniejszy, choć w Azji obecnie buduje się wiele reaktorów. Największa bariera w rozbudowie sieci elektrowni jądrowych to wysokie nakłady inwestycyjne na budowę, wyszkolenie personelu, konieczność zabezpieczenia i składowania odpadów.

Reaktory jądrowe są używane nie tylko do produkcji energii elektrycznej, ale również np. jako napęd łodzi podwodnych i statków, co pozwala im pływać przez wiele miesięcy bez konieczności tankowania. Zapasy paliwa jądrowego w reaktorze wystarczają na znacznie dłużej niż olej napędowy zgromadzony w zbiornikach statków napędzanych konwencjonalnymi silnikami. Ponadto wiele reaktorów ma charakter badawczy. Reaktory jądrowe są również używane do zasilania odsalarek wody morskiej.

Podsumowanie

- Źródłem energii wybuchu bomby atomowej są reakcje rozszczepienia zawartego w niej uranu lub plutonu (${}_{92}^{235}\text{U}$ lub ${}_{94}^{239}\text{Pu}$).
- Materiał rozszczepialny występujący w bombie jest podzielony na kilka oddalonych od siebie fragmentów. Masa każdej z tych części jest mniejsza od masy krytycznej.
- Detonacja zawartego w bombie klasycznego materiału wybuchowego prowadzi do szybkiego ściśnięcia i połączenia ze sobą fragmentów ładunku nuklearnego, a w konsekwencji do przekroczenia masy krytycznej, co umożliwi niekontrolowaną reakcję łańcuchową i wybuch bomby.
- W elektrowniach jądrowych energia elektryczna jest wytwarzana w turbinach napędzanych parą wodną podobnie jak w klasycznych elektrowniach, np. węglowych.
- W elektrowniach jądrowych jako źródło energii, w miejsce klasycznego kotła opalanego np. węglem, stosuje się reaktor jądrowy.

- Źródłem energii w reaktorze jest kontrolowana reakcja łańcuchowa rozszczepienia ciężkich jąder (najczęściej uranu $^{235}_{92}\text{U}$).
- Uran znajduje się wewnątrz reaktora w postaci prętów paliwowych.
- Reakcję łańcuchową w reaktorze umożliwia moderator spowalniający neutrony. Jest nim najczęściej woda.
- Ilość energii wytwarzanej w reaktorze jądrowym można regulować poprzez kontrolę liczby zachodzących procesów rozszczepienia. Służą do tego kadmowe pręty kontrolne pochłaniające neutrony.
- Podczas normalnej pracy prawidłowo skonstruowane i wybudowane elektrownie jądrowe nie powodują radioaktywnego skażenia otoczenia.
- Niemożliwy jest wybuch reaktora analogiczny do wybuchu bomby atomowej.
- Elektrownie jądrowe konstruuje się tak, by zminimalizować ryzyko wystąpienia skażenia radioaktywnego w przypadku awarii. Nie jest jednak możliwe pełne zabezpieczenie przed wszystkimi rodzajami katastrof.
- Duży problem związany z eksploatacją elektrowni jądrowych stwarza przechowywanie zużytego paliwa jądrowego, które zawiera wiele silnie radioaktywnych składników.

Zadania

1. Odpowiedz na pytania:
 - Jaka jest zasadnicza różnica między elektrownią jądrową a klasyczną elektrownią węglową?
 - Do czego służą pręty sterujące w reaktorze jądrowym?
 - Dlaczego w reaktorze jądrowym znajduje się moderator?
2. Aby lepiej poznać działanie reaktora w elektrowni, zostań na chwilę operatorem kierującym jego pracą. W tym celu uruchom znajdujący się w serwisie internetowym ZamKoru aplet symulujący pracę reaktora.
3. Jednym z epizodów II wojny światowej była tzw. bitwa o ciężką wodę. Poszukaj informacji na ten temat i przygotuj odpowiedzi na pytania:
 - Jaki związek ma ten epizod z fizyką jądrową.

- Czy wynik tej „bitwy” miał wpływ na dalsze losy II wojny światowej?
4. Wymień najważniejsze korzyści oraz problemy wynikające z zastąpienia elektrowni klasycznych przez elektrownie jądrowe.
 5. a) Oblicz masę rozszczepialnego ${}_{92}^{235}\text{U}$, który ulega rozpadowi w ciągu miesiąca pracy elektrowni jądrowej o mocy 4000 MW i sprawności 40%. Załóż, że w procesie rozpadu jednego jądra uranu otrzymuje się 200 MeV energii, a masa jądra wynosi 235 u.
b) Oblicz, ile wagonów węgla trzeba dostarczyć dziennie do elektrowni węglowej o identycznej mocy i sprawności. Ciepło spalania węgla wynosi 33 MJ/kg, a przeciętny wagon mieści 50 ton węgla.
Wskazówka: Sprawność elektrowni 40% oznacza, że 40% energii uzyskanej z paliwa (np. z rozszczepienia uranu lub spalania węgla) zostaje w elektrowni zamienione na energię elektryczną.
 6. Do chłodzenia turbiny w elektrowni jądrowej o mocy 2000 MW i sprawności 40% używa się wody o temperaturze 20°C pobieranej z pobliskiej rzeki, która zapewnia przepływ 50 000 l/s. Ciepło właściwe wody wynosi $4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, a jej gęstość 1000 kg/m³. Oblicz temperaturę wody wypuszczanej z powrotem do rzeki.
Skorzystaj ze wskazówki do zadania 5.
 7. Poszukaj informacji o zastosowaniach reaktorów jądrowych i omów te, które uznasz za najciekawsze.
 8. Przygotuj się do dyskusji na temat: *Czy należy rozwijać energetykę jądrową?*
 9. Poszukaj informacji o awariach w elektrowni Three Miles Island oraz w elektrowni w Czarnobylu. Omów podobieństwa i różnice tych dwóch awarii.