

mł. bryg. dr inż. Rafał POROWSKI
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego
Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Wprowadzenie do teorii wybuchów jądrowych

An Introduction to the Theory of Nuclear Explosions

Streszczenie

W artykule omówiono kwestie związane z wytwarzaniem energii jądrowej podczas wybuchów jądrowych, tj. energii generowanej w wyniku powstawania nowych jąder atomowych, dzięki redystrybucji protonów i neutronów w oddziaływającym jądrze, tworząc tym samym po procesie zupełnie nowe pierwiastki. Można osiągnąć to w dwojaki sposób – albo łącząc je w procesie fuzji, albo rozdzielając w procesie rozszczepienia. Energia jądrowa początkowo była wykorzystywana w celach wojennych, jednak naukowcy zaczęli się coraz intensywniej zastanawiać nad tym, jak można ją wykorzystać w celach pokojowych z pożytkiem dla ludzi. W artykule opisano historię teorii wybuchów jądrowych, a także pierwsze próby ich przeprowadzenia oraz rozwój badań nad ich wykorzystaniem w celu służby społeczeństwu. Wyjaśniono podstawowe zasady rozszczepienia jąder atomów i fuzji oraz mechanizmu reakcji łańcuchowej towarzyszącej wybuchom jądrowym, a także ich zastosowanie w elektrowniach jądrowych. Oprócz tego przedstawiono klasyfikację wybuchów jądrowych oraz ich krótką charakterystykę. Następnie opisano projekt Trinity, tzn. pierwszy naziemny test broni jądrowej przeprowadzony przez Stany Zjednoczone w 1945 r. oraz zestawiono badania wybuchów jądrowych we Francji w latach 1960-1974.

Słowa kluczowe: wybuch jądrowy, bezpieczeństwo jądrowe, elektrownie jądrowe, energia jądrowa

Summary

In article issues related to production of nuclear power during nuclear explosions are discussed (e.g. energy generated during formation of new nuclei due to protons and electrons redistribution). It causes thereby the emergence of new elements. It can be achieved in two ways – connection by fusion and splitting by fission processes. Nuclear energy was used for military purposes initially, but scientists were wondering more and more intensively how to use this energy in a peaceful way, for the people benefits. Furthermore, the history of nuclear explosions is described here, with the first attempts to perform and the development in researches aiming at the use of nuclear power in public service. Basic rules of fission and fusion processes are explained here, and nuclear explosions accompanied by the chain reaction with

their applications in nuclear power plants are discussed. Except that, the classification and the characteristic of nuclear explosions are presented. After that, the Trinity test is described, i.e. the first aboveground nuclear weapon test performed by United States in 1945. The article also presents the Nuclear explosion tests in France between 1960-1974.

Keywords: nuclear explosion, nuclear safety, nuclear power plant, nuclear energy

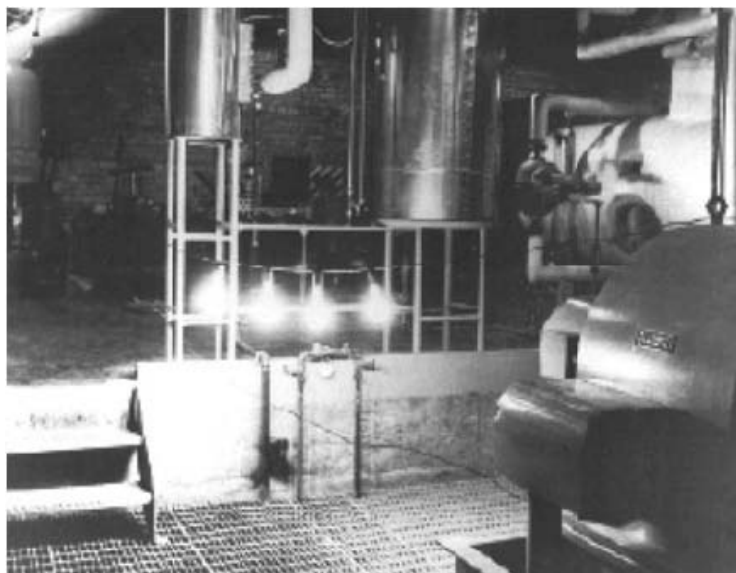
1. Historia badań jądrowych na świecie

Koncepcja atomu istnieje już wiele wieków, ale dopiero ostatnio zaczęto rozumieć olbrzymią moc zawartą w tej niewielkiej masie. W latach ubiegłych, tuż przed II wojną światową, badania jądrowe skupiały się głównie na rozwoju broni masowego rażenia do celów militarnych. Później naukowcy skoncentrowali swoją uwagę na pokojowym zastosowaniu technologii jądrowych. Ważnym zastosowaniem energii jądrowej jest wytwarzanie elektryczności. Po latach badań, naukowcy pomyślnie zastosowali technologię jądrową w celach naukowych, medycznych oraz przemysłowych. Starożytni filozofowie greccy jako pierwsi rozwinęli myśl, że cała materia jest złożona z niewidzialnych cząsteczek zwanych atomami. Słowo atom pochodzi od greckiego słowa „atomos”, co znaczy niepodzielny. W XVIII i XIX w. naukowcy poprawili ten koncept, bazując na swoich eksperymentach. Po 1900 r. fizycy wiedzieli, że atom zawiera duże ilości energii [1]. Każdy atom składa się ze względnie ciężkiego regionu centralnego, tzw. „jądra”, otoczonego przez dużą ilość bardzo lekkich cząstek zwanych „elektronami”. Jądro atomu jest złożone ze skończonej liczby podstawowych cząstek, zwanych „protonami” i „neutronami”. Te dwa rodzaje cząstek mają prawie taką samą masę, ale różnią się pod takim względem, że protony noszą ładunek jednostkowy o pozytywnym znaku, podczas gdy neutron, tak jak jego nazwa wskazuje, jest elektrycznie obojętny – neutralny. Obecność protonów w jądrze atomu daje ostatecznie jego pozytywny ładunek elektryczny. Jednak w normalnym atomie jest to dokładnie bilansowane przez negatywny ładunek noszony przez elektrony otaczające jądro [2].

Brytyjski fizyk, Ernest Rutherford, został nazwany ojcem badań jądrowych dzięki swemu wkładowi do teorii struktury atomów. W 1904 r. napisał: Gdyby było kiedykolwiek możliwe, by kontrolować szybkość rozpadu pierwiastków radioaktywnych, można by otrzymać ogromną ilość energii z małej ilości materii. Rok później Albert Einstein rozwinął tę teorię o stosunek między masą i prędkością światła. Prawie 35 lat zajęło by ktoś potwierdził teorię Einsteina.

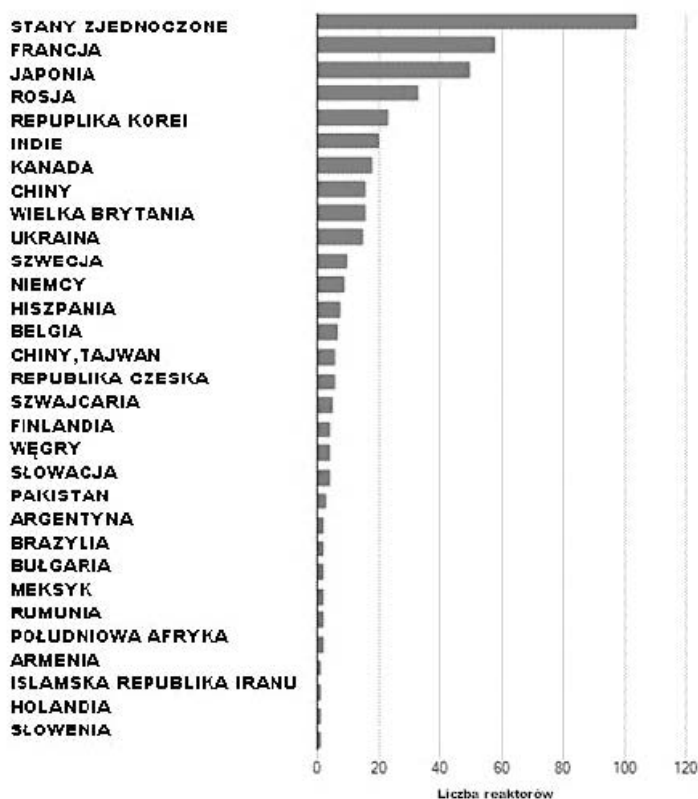
W 1934 r. włoski fizyk, Enrico Fermi, prowadził badania doświadczalne na Uniwersytecie Sapienza w Rzymie, które wykazały, że neutrony mogą rozdzielić wiele rodzajów atomów. Wynik zaskoczył nawet samego Fermiego. Kiedy zbombardował atom uranu neutronami, nie otrzymał pierwiastków takich, jakich się spodziewał. Otrzymane przez niego pierwiastki były o wiele lżejsze niż uran.

Pod koniec 1938 r. niemieccy naukowcy, Otto Hahn i Fritz Strassman, wystrzelili neutrony ze źródła zawierającego pierwiastek radu i berylu w uran (o liczbie atomowej 92). Nie spodziewano się takich wyników badań, tym bardziej, że w produktach reakcji rozpadu odkryli lżejsze pierwiastki, takie jak bar o liczbie atomowej 56. W 1939 r., gdy Bohr odwiedził Stany Zjednoczone, podzielił się z Einsteinem odkryciami dokonanymi przez trójkę naukowców: Hahn-Strassman-Meitner. Poznał on wówczas również Fermi'ego podczas konferencji w zakresie fizyki teoretycznej w Waszyngtonie. Dyskutowali wtedy na temat ekscytującej możliwości wywołania samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej. W takim procesie, atomy, dzieląc się, uwalniają ogromne ilości energii. Naukowcy na całym świecie zaczęli wierzyć, że zapoczątkowanie samopodtrzymującej się reakcji jest możliwe. Udałoby się to, gdyby zebrano wystarczającą ilość uranu w odpowiednich warunkach. Ilość uranu potrzebna do wytworzenia samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej jest nazywana masą krytyczną. W 1941 r. Fermi i jego współpracownik, Leo Szilard, zaproponowali realny projekt reaktora łańcuchowego z wykorzystaniem uranu. Ich model składał się z uranu położonego w stosie grafitu w taki sposób, by stworzyć sześcianopodobną ramę rozszczepialnego materiału. W 1942 r. grupa naukowców prowadzona przez Fermi'ego zgromadziła się na Uniwersytecie w Chicago, by rozwinąć teorię energetyki jądrowej. Od listopada 1942 r. byli gotowi do rozpoczęcia budowy pierwszego na świecie reaktora jądrowego, który znany był jako „Chicago Pile-1”. Został zbudowany na płycie boiska do squasha przy stadionie atletycznym Uniwersytetu w Chicago.



Ryc. 1. Pierwszy reaktor eksperymentalny, który wytworzył energię w czterech 200-watowych żarówkach, skonstruowany w 1951 r. [1]

Pierwszy reaktor jądrowy stanowił jedynie preludium do współczesnych technologii energetyki jądrowej. Większość wczesnych badań jądrowych skupiała się na rozwoju skutecznej broni masowego rażenia, którą planowano zastosować podczas II wojny światowej. Prace te zakończono pod kryptonimem „Projekt Manhattan”. Jednakże niektórzy naukowcy pracowali nad stworzeniem reaktora, który mógłby wytwarzać rozszczepialny materiał w reakcji łańcuchowej, w celu otrzymania materiału bardziej rozszczepialnego niż ten użyty do reakcji.



Ryc. 2. Liczba działających elektrowni jądrowych na świecie [3]

Po II wojnie światowej rząd Stanów Zjednoczonych zachęcał naukowców do rozwijania technologii energetyki jądrowej w celach pokojowych. W 1946 r. powołano Komisję Energii Atomowej (AEC), która autoryzowała konstrukcję pierwszego reaktora eksperymentalnego, budowanego na obrzeżach Idaho. Reaktor ten wytworzył pierwszą elektryczność z energii jądrowej 0 grudnia 1951 r. (ryc. 1). Głównym celem badań jądrowych było pokazanie społeczeństwu, że energia jądrowa może wytwarzać elektryczność na potrzeby zasilania dużych miast. Pierwsza elektrownia jądrowa powstała w miejscowości Shippingport w stanie Pensylwania w USA. Elektrownia ta osiągała pełną zaprojektowaną moc już

w 1957 r. Liczba elektrowni jądrowych w Stanach Zjednoczonych wzrosła gwałtownie w 1960 r. Przedsiębiorstwa użytku publicznego zauważyły, że ta nowa forma wytwarzania energii jest ekonomiczna, czysta i bezpieczna. Po roku 1980 zapotrzebowanie na elektryczność zmalało, a liczba koncernów energetycznych wzrosła. W 1991 r. Stany Zjednoczone w dalszym ciągu miały dwa razy więcej elektrowni jądrowych niż jakiegokolwiek inne państwo. Stanowiło to w tamtym czasie więcej niż 1/4 ogólnych zasobów światowych. Energia jądrowa dostarcza prawie 22% elektryczności wytwarzanej w USA. Poniżej zamieszczono diagram pokazujący ilość czynnych elektrowni jądrowych z podziałem na państwa, które je użytkują.

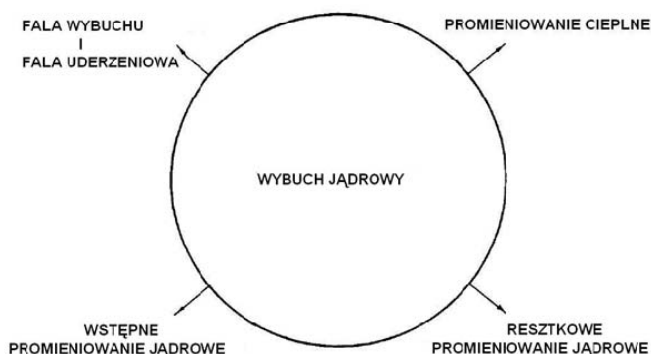
2. Charakterystyka wybuchów jądrowych

Ogólnie rzecz biorąc, wybuch jest skutkiem gwałtownego wydzielania się dużej ilości energii w ograniczonej przestrzeni. Takie nagłe jej uwolnienie powoduje wzrost ciśnienia i temperatury, w wyniku czego użyte substancje zmieniają się w ciepłe, skompresowane gazy, którym towarzyszy powstanie fali spalania i/lub fali uderzeniowej. Wybuchy można ogólnie podzielić ze względu na rodzaj energii użytej do ich wytworzenia na jądrowe oraz konwencjonalne (chemiczne i fizyczne). Wybuch jądrowy różni się od konwencjonalnego nie tylko źródłem energii, ale także ilością materii użytej do jego wytworzenia, jak również nieporównywalną ilością uwolnionej w tych dwóch procesach energii. W klasycznej teorii wybuchu, uwolniona energia generowana jest w wyniku reakcji chemicznej, co włącza przekształcenia wśród atomów, np. wodoru, węgla, tlenu i azotu, obecnych wśród wysoko-energetycznych materiałów wybuchowych. W wybuchu jądrowym energia produkowana jest w wyniku powstawania różnych jąder atomowych poprzez redystrybucję protonów i neutronów wewnątrz oddziałującego jądra. To, co jest czasami nazywane energią atomową, jest w rzeczywistości energią jądrową, gdy skutkuje w szczególności oddziaływaniami nuklearnymi. Z tego samego powodu również broń atomowa jest chętniej nazywana „bronią jądrową”. Siły między protonami i neutronami wewnątrz jądra atomu są znacznie większe, niż te pomiędzy atomami. Zatem energia jądrowa posiada znacznie wyższy rząd wielkości niż energia chemiczna, gdy brane pod uwagę są równe masy.

Powszechnie znanych jest wiele procesów jądrowych, ale nie wszystkim z nich towarzyszy wydzielanie energii. Określona została równość pomiędzy masą i energią, a gdy następuje ubytek masy w reakcji jądrowej, towarzyszy mu wydzielanie się pewnej ilości energii odpowiadającej ubytkowi masy. Takie zmiany masy stanowią odbicie różnicy sił wewnętrznych w różnych jądrach. Dodatkowo, oprócz konieczności, aby w procesie rozszczepienia jądra wystąpił spadek masy, uwolnienie energii jądrowej wystarczającej do wybuchu wymaga, by reakcja była zdolna do własnej reprodukcji. Istnieją dwa rodzaje oddziaływania

jądrowego, które mogą sprostać warunkom produkcji dużych ilości energii w krótkim czasie. Znane są jako „rozszczerzenie” (podział) i „fuzja” (łączenie). Pierwszy z tych procesów zachodzi z udziałem cięższych (o wysokiej liczbie atomowej) jąder, natomiast drugi proces dotyczy jąder najlżejszych (o niskiej liczbie atomowej).

Tak zwana „wydajność” broni jądrowej jest miarą ilości energii wybuchu, która może zostać wygenerowana podczas tego zjawiska. Zazwyczaj określenie wydajności broni jądrowej odbywa się na zasadzie porównania do ilości trójnitrotoluenu (TNT) jako referencyjnego materiału wybuchowego, wytwarzającego tę samą ilość energii podczas wybuchu. Zatem jedna kilotona broni jądrowej wytwarza tyle samo energii podczas wybuchu, co jedna kilotona (lub 1000 ton) ładunku TNT. Jedną z ważnych różnic między wybuchem jądrowym i wybuchem konwencjonalnym jest obecność znacznej ilości energii, emitowanej w postaci promieniowania cieplnego. Podstawowym powodem tej różnicy jest fakt, że energia wytwarzana w wyniku wybuchu jądrowego jest milion razy większa niż ta wytwarzana przez wybuch chemiczny. W związku z tym temperatury osiągnięte w pierwszym przypadku są znacznie wyższe niż w przypadku drugim. Skutkiem tak dużej różnicy temperatur jest fakt, iż rozkład energii wybuchu jest znacząco różny w tych dwóch przypadkach.



Ryc. 3. Skutki wybuchu jądrowego [2]

Temperatury towarzyszące wybuchom jądrowym są o wiele wyższe niż w konwencjonalnym wybuchu oraz dodatkowo emitowane są dosyć duże proporcje energii w formie światła i ciepła, ogólnie określane jako promieniowanie cieplne, które w wyniku oddziaływania na organizm ludzki powodować mogą obszerne poparzenia ciała, a w przypadku oddziaływania na materiały palne, inicjację pożarów na znacznej przestrzeni. Wybuchom jądrowym towarzyszą również wysoce przenikliwe i szkodliwe dla organizmów żywych oraz niewidoczne promienie, nazywane wstępnym promieniowaniem jądrowym. Produkty wybuchu jądrowego są radioaktywne, emitują podobne promieniowanie, z tym że w dłuższym okresie czasu. Określa się to jako resztkowe promieniowanie jądrowe [2].

3. Rodzaje wybuchów jądrowych

Zasadniczo rozróżnia się pięć rodzajów wybuchów jądrowych, aczkolwiek w praktyce może powstać wiele zmiennych i pośrednich sytuacji. Główne rodzaje wybuchów, które zostaną tu zdefiniowane to wybuch powietrzny, wybuch na dużych wysokościach, wybuch podwodny, wybuch podziemny i wybuch powierzchniowy. Zakładając, że wybuch jądrowy będzie miał miejsce na określonej wysokości powyżej poziomu morza, gdzie zachodzą warunki atmosferyczne tj. na wysokości poniżej ok. 30,48 km n.p.m., resztki broni prawie natychmiast włączą materiał otaczającego medium i tworzą intensywnie gorącą i świecąca masę o kształcie przypominającym charakterystyczną sferę zwaną kulą ognia (Fireball). Taki rodzaj wybuchu określany jest jako sytuacja, w której ładunek wybuchu w powietrzu na wysokości poniżej 30,48 km n.p.m., ale równocześnie na takiej wysokości, aby kula ognia nie dotykała powierzchni Ziemi. Wstępne promieniowanie jądrowe, powstałe w wyniku wybuchu powietrznego, rozprzestrzeniać się będzie głównie w powietrzu, aczkolwiek intensywność promieniowania będzie się zmniejszała wraz ze zwiększającym się dystansem od epicentrum wybuchu.

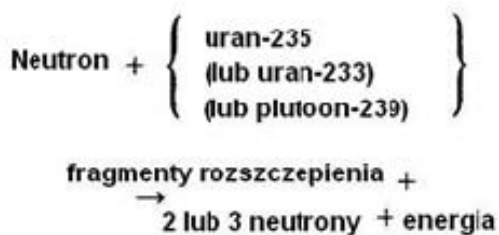
Wybuch jądrowy na dużej wysokości to wybuch mający miejsce na wysokości powyżej 30,48 km nad poziomem morza. Powyżej tego poziomu gęstość powietrza jest tak niska, że oddziaływanie energii ładunku z otoczeniem jest znacząco inne niż te z niższych wysokości. Występowanie gęstego powietrza powoduje inną charakterystykę kuli ognia dla wybuchu na dużych wysokościach, a inną w przypadku wybuchu powietrznego. Dwa czynniki wpływają zasadniczo na to, że energia cieplna promieniuje na takich wysokościach. Pierwszym czynnikiem jest to, że fala uderzeniowa nie tworzy się tak łatwo w ośrodku o mniejszej gęstości, a kula ognia jest w stanie promieniować energię cieplną, która może być użyta do powstania wybuchu. Drugim czynnikiem jest to, że ośrodek o mniejszej gęstości pozwala energii towarzyszącej podczas wybuchu ładunku pokonywać większe odległości niż w innym przypadku. Powód tego jest taki, że część tej energii ogrzewa powietrze w pewnej określonej odległości od środka kuli ognia i tym samym nie bierze udziału w zjawisku promieniowania. Oba promieniowania jądrowe, tj. wstępne i resztkowe, powstałe w wyniku wybuchów jądrowych na dużych wysokościach, będą oddziaływać ze składnikami atmosfery tak, by wydalić elektrony z atomów i cząsteczek. Podczas gdy elektrony noszą negatywny ładunek elektryczny, pozostała część atomu będzie naładowana pozytywnie, tzn. stanowić będzie pozytywny jon.

Jeśli wybuch jądrowy występuje w takich warunkach, że jego centrum jest pod ziemią lub pod powierzchnią wody, wówczas określa się to zjawisko odpowiednio jako wybuch podziemny lub wybuch podwodny. Jako że niektóre efekty tych dwóch rodzajów wybuchów są podobne, będą rozpatrywane tu wspólnie jako wybuchy podpowierzchniowe. Zatem podczas wybuchów podpowierzchniowych większość energii wybuchu pochłaniana jest przez wodę lub glebę. Znaczna część

promieniowania cieplnego i wstępnego promieniowania jądrowego zostanie pochłonięta w małej odległości od wybuchu. Energia pochłoniętego promieniowania przyczyni się jedynie do ogrzewania ośrodka w postaci gleby lub wody. Należy jednak pamiętać, że w tym przypadku resztkowe promieniowanie jądrowe tj. promieniowanie emitowane po pierwszej minucie od wybuchu stanowić będzie większe znaczenie, z uwagi na fakt, że duża powierzchnia gleby lub wody w okolicach wybuchu zostanie zanieczyszczona produktami rozszczepienia radioaktywnego.

Wybuch jądrowy powierzchniowy określa się jako wybuch, który występuje na lub trochę pod rzeczywistą powierzchnią gleby lub wody, pod warunkiem, że odległość ta nie jest za duża. Wówczas przyjmuje się, że zjawiska te są zasadniczo takie same jak wybuchy zachodzące na powierzchni. Podczas gdy wysokość wybuchu wzrasta do punktu, w którym kula ognia nie dotyka dłużej powierzchni ziemi lub wody, istnieje pewna strefa przejściowa, w której istnieją określone cechy wspólne wiążące wybuch powierzchniowy z wybuchem powietrznym. W wybuchu powierzchniowym fala wybuchu i fala uderzeniowa są wytwarzane w różnych proporcjach zależnych od energii wybuchu i wysokości powyżej poziomu morza [2].

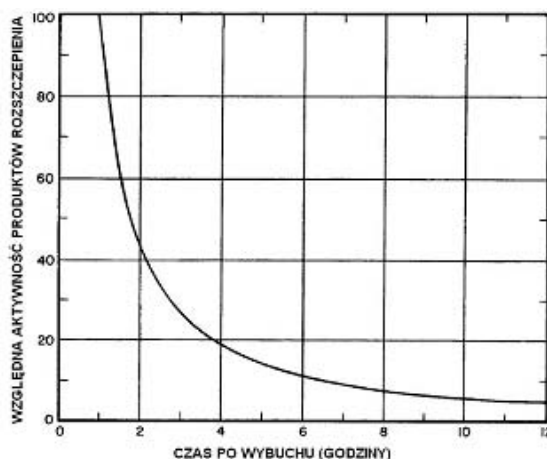
4. Reakcja łańcuchowa i aktywność produktów rozszczepienia



Ryc. 4. Schemat procesu rozszczepienia [2]

Neutrony uwolnione w ten sposób są zdolne do zapoczątkowania rozszczepienia dodatkowych jąder uranu (lub plutonu), a każdy taki proces skutkuje emisją kolejnych neutronów mogących powodować późniejsze rozszczepienia. Zatem pojedynczy neutron może zapoczątkować łańcuch nuklearnego rozszczepienia, a uwolniona ener-

gia wzrasta w ogromnym stopniu. Z uwagi na fakt, że procesowi rozszczepienia towarzyszy chwilowe uwolnienie neutronów, możliwe jest powstanie samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej wraz z szybkim uwalnianiem się dużych ilości energii. Na skutek tego nawet kilka funtów materiału rozszczepialnego może się uwolnić w ciągu kilku milisekund co porównywalne jest do siły wybuchu kilku tysięcy ton TNT. Stanowi to podstawową regułę projektowania broni jądrowej. Warunkiem samopodtrzymywania się tej reakcji jest konieczność wytwarzania w reakcji rozszczepienia co najmniej jednego neutronu zdolnego wywołać następne rozszczepienie. Gdy w każdej reakcji rozszczepienia będzie powstawać średnio więcej niż jeden z takich neutronów, reakcja rozwinie się lawinowo, gdy mniej, reakcja łańcuchowa wygaśnie.



Ryc. 5. Stopień rozpadu produktów rozszczepienia po wybuchu jądrowym [2]

Na ryc. 5 pozostałości promieniowania produktów rozszczepienia po jednej godzinie od detonacyjnego wybuchu jądrowego przyjęto jako wartość równą 100, a późniejszy spadek w czasie obrazuje krzywa. Widać tu wyraźnie, że po 7 godzinach od wybuchu jądrowego, aktywność produktów rozszczepienia spada do około jednej dziesiątej (10%) wartości założonej po godzinie. W czasie około 2 dni, ta aktywność spadnie natomiast do 1% wartości [2].

5. Badania doświadczalne wybuchów jądrowych

Jednym z pierwszych badań doświadczalnych w zakresie wybuchów jądrowych w dużej skali był test Trinity¹, kryptonim, który został nadany przez Oppenheimera² dla pierwszego naziemnego testu broni jądrowej, który został przeprowadzony w Stanach Zjednoczonych 16 lipca 1945 r. Detonacja bomby miała siłę około 20 kiloton i została uznana za początek ery atomowej. Test ten był kulminacją kilkuletniego programu badawczego nad konstrukcją broni jądrowej, znanego jako Projekt Manhattan³. Test ten został przeprowadzony na pustyni w pobliżu miasta Alamogordo (Nowy Meksyk), na poligonie noszącym obecnie nazwę White Sands Missile Range. Przygotowania do testu zaczęły się w marcu 1944 r. i osiągnęły punkt kulminacyjny podczas próbnej detonacji 100-tonowej bomby jądrowej.

¹ z ang. trójca.

² Amerykański fizyk, profesor na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley, dyrektor naukowy Projektu Manhattan – trwającego w czasie II wojny światowej przedsięwzięcia mającego na celu opracowanie pierwszej broni atomowej. Z tego powodu jest nazywany ojcem bomby atomowej [11].

³ Była to ściśle tajna operacja, która miała na celu wytworzenie bomby atomowej podczas II wojny światowej. Miało to dać przewagę nad państwami osi (Niemcami, Japonią i Włochami). Prace rozpoczęto w 1942 r. w 3 ośrodkach w USA [12]

Wówczas bardzo mało było wiadomo na temat warunków przeprowadzania tego typu prac doświadczalnych oraz oddziaływania fali uderzeniowej wygenerowanej przez kilka ton materiału wybuchowego. Analiza wyników w zakresie oddziaływania fali uderzeniowej oraz trzęsienia ziemi mogłaby pomóc w określeniu właściwych struktur zdolnych do wytrzymania tych efektów w czasie ostatecznego strzału poprzez użycie odpowiednich współczynników skali. Przed przeprowadzeniem tego badania dokonano testu kalibracyjnego, którego celem było pozyskanie informacji o parametrach detonacji 100-tonowego ładunku materiału wybuchowego oraz określenie procedur bezpieczeństwa niezbędnych do przeprowadzenia wybuchu jądrowego.

Test został przeprowadzony z wykorzystaniem 100 ton materiału wybuchowego ułożonego na platformie wieży o wysokości 6,1 m. Stos ten został wyposażony w rury zawierające radioaktywny roztwór o niskim poziomie aktywności produktów radioaktywnych spodziewanych podczas wybuchu jądrowego. Przeprowadzono pomiary parametrów fali uderzeniowej, trzęsienia ziemi oraz zniszczenia urządzeń i innych obiektów na założonych odległościach porównywanych z dystansami proponowanymi dla docelowego testu. Ponadto przeprowadzono obserwacje fotograficzne w pełnej odległości zaproponowanej dla testu końcowego. Uzyskane podczas tego badania wyniki i obserwacje pogrupowano w następujące grupy tematyczne:

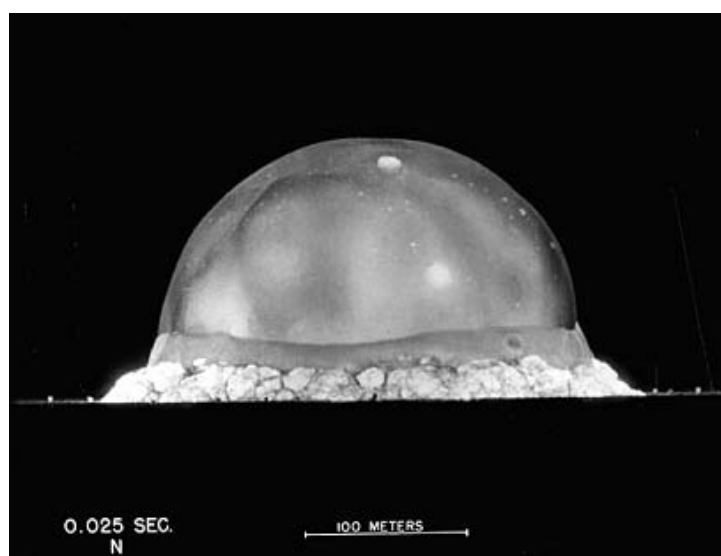
- zjawisko implozji,
- uwolniona energia nuklearna,
- oddziaływanie skutków wybuchu,
- zjawisko wybuchu oraz późniejsze efekty.

Włączając personel wojskowy, do badań zaangażowano około 200 ludzi. Zważając na okoliczności, że test był wykonywany przy bardzo napiętym harmonogramie działań i stanowił jedynie test próbny, to organizację przeprowadzono z sukcesem. Przygotowania do badań końcowych znacznie przyspieszyły, zaczynając od marca 1945 r., a koniec zaplanowany był na lipiec 1945 r. W ostatnich 2 tygodniach przed eksperymentem, około 250 ludzi było zaangażowanych w prace techniczne, a wielu więcej przyczyniło się do teoretycznych i eksperymentalnych studiów z budowy sprzętu niezbędnego do tych badań. Po uwzględnieniu wszystkich ważniejszych czynników data eksperymentu została wyznaczona na 16 lipca 1945 r. Stworzono wówczas dokładny harmonogram prac, w którym należało między innymi przygotować sprzęt elektroniczny, schrony, instrukcje dla personelu oraz sprawy związane z kontrolą i bezpieczeństwem pracy. Montaż ładunku w postaci bomby Trinity poprzedzony był kilkoma dodatkowymi testami próbnymi, aby udoskonalić ładowania bomby oraz zminimalizować usterki. W dniu eksperymentu ostateczne odliczanie rozpoczęło o godzinie 5:10, a wybuch nastąpił o godzinie 5:29:45. Siła wybuchu była tak ogromna, że spowodowała pęknięcie szyb w odległości ok. 320 km od centrum wybuchu. Krater, który powstał po wybuchu miał głębokość ok. 3 m i średnicę

ok. 300 m., natomiast piasek w miejscu eksplozji został całkowicie stopiony dając w efekcie radioaktywne szkliwo koloru zielonego (od żelaza), nazwane później trinititem. Grzyb atomowy osiągnął wysokość ok. 12 km. Wszystko było filmowane i fotografowane przez wiele kamer rozmieszczonych w różnych miejscach poligonu doświadczalnego. Dokonano również bieżących pomiarów skażenia radioaktywnego oraz licznych obserwacji meteorologicznych. Większość naukowców zaangażowanych w budowę bomby obserwowała eksperyment ze schronów lub z pobliskiej bazy wojskowej. Kilka godzin po wybuchu pojechano czołgami do punktu zero, aby naocznie sprawdzić efekty eksplozji. Stwierdzono, że z platformy, na której został umieszczony ładunek, pozostały tylko fragmenty żelbetowych fundamentów [5].

Po teście Trinity, w Stanach Zjednoczonych dalej trwały inne badania i doświadczenia w podobnym zakresie. W latach 1945-1992 przeprowadzono ogółem ponad tysiąc eksperymentów dotyczących wybuchów jądrowych, w tym ponad 20 przy współpracy z Wielką Brytanią. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie zbiorcze wyników badań doświadczalnych wybuchów jądrowych, które przeprowadzono we Francji w latach 1960-1974 [9].

Podczas przeprowadzonych badań doświadczalnych w zakresie wybuchów jądrowych najwięcej ładunków zostało zainicjowanych pod ziemią, natomiast najmniej pod wodą. Wielka Brytania współpracowała z USA jedynie w wybuchach podziemnych. Na ryc. 6 przedstawiono fotografię obrazującą wybuchu jądrowy Priscilla, który został zdetonowany 24 czerwca 1957 roku w Nevadzie, w USA, była to bomba typu „balon” użyta w teście związanym z bronią i wytworzyła 37 kiloton energii.



Ryc. 6. Eksplozja ładunku Trinity, 0,025 sekund po inicjacji [5]



Ryc. 7. Wybuch jądrowy Priscilla przeprowadzony w dniu 24.06.1957 r. w Nevadzie w USA [7]

Na ryc. 7 przedstawiono fotografię obrazującą wybuch jądrowy Grable, który został wystrzelony z działa 280 mm, 25 maja 1953 roku w Nevadzie. Był to nadziemny, związany z bronią test, który wytworzył 15 kiloton energii.



Ryc. 8. Wybuch jądrowy Grable zainicjowany z broni o średnicy 280 mm w dniu 25.05.1953 w Nevadzie [7]

Tabela 1. Badania wybuchów jądrowych we Francji w latach 1960-1974 [9]

Data (Date)	Nazwa (Name)	Typ (Type)	Miejsce (Place)	Energia [KT] (Energy)		Wysokość [m] (Altitude)	Tropopauzy [hm] (Tropopause)	Głowa chmury [hm] (Cloud head)	
				Rozszczepienie (Fission)	Całkowita (Total)			Podłoże (Base)	Szczyt (Top)
13.02.60	Gerboise bleue	Wieża	Reggane	67	67	100	154	110	150
01.04.60	Gerboise blanche	Powierzchnia	Reggane	3	3	0	–	30	50
25.04.61	Gerboise rouge	Wieża	Reggane	2	2	50	–	25	40
02.07.66	Tamoure	Powietrze	Mururoa	50	50	1000	156	110	150
21.07.66	Ganymede	Bezpieczeństwo	Mururoa	0	0	12	155	–	–
11.09.66	Betelgeuse	Balon	Mururoa	110	110	470	148	100	180
05.06.67	Altair	Balon	Mururoa	15	15	295	159	65	110
27.06.67	Arcturus	Barka	Mururoa	22	22	0	156	50	95
03.08.68	Polloux	Balon	Mururoa	150	150	490	166	105	185
24.08.68	Canopus	Balon	Fangataufa	–	2600	520	164	140	240
15.05.70	Andromede	Balon	Mururoa	13	13	220	147	75	110
30.05.70	Dragon	Balon	Fangataufa	–	945	500	126	150	210
12.06.71	Encelade	Balon	Mururoa	–	450	-	175	55	170
08.08.71	Phoebe	Balon	Mururoa	4	4	230	135	–	50
25.06.72	Umbriel	Balon	Mururoa	0,5	0,5	230	123	–	25
27.07.72	Oberon	Balon	Mururoa	6	6	220	166	65	85
28.07.73	Melponeme	Balon	Mururoa	0,05	0,05	270	147	18	23
13.09.73	Nesta	Wieża	Mururoa	0	0	4	143	–	5
25.07.74	Maquis	Powietrze	Mururoa	8	8	250	–	–	–
28.07.74	Persee	Wieża	Mururoa	0,001	0,001	5,6	–	–	–

Podsumowanie

Teoria wybuchów jądrowych od dawna stanowiła przedmiot zainteresowania naukowców na całym świecie, szczególnie ze względu na swoje ogromne praktyczne zastosowanie. Koncepcja atomu istnieje już wiele wieków, ale dopiero ostatnio zaczęto rozumieć olbrzymią moc zawartą w jego bardzo niewielkiej masie. W latach wcześniejszych, tuż przed II wojną światową, badania jądrowe skupiały się głównie na rozwoju broni w celach militarnych. Dopiero jakiś czas później naukowcy skoncentrowali swoją uwagę na pokojowym zastosowaniu technologii jądrowych. Jednym z ważniejszych, a jednocześnie przynoszącym najwięcej korzyści zastosowaniem energii jądrowej jest wytwarzanie elektryczności, a po latach badań naukowcy pomyślnie zastosowali technologię jądrową w innych dziedzinach wiedzy. W Polsce do tej pory nie wybudowano jeszcze elektrowni jądrowej, przede wszystkim ze względu na brak świadomości społecznej, a co za

tym idzie z uwagi na strach przed zagrożeniem wybuchu jądrowego. Energia jądrowa posiada wiele korzyści społecznych między innymi takie jak zapewnienie bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej, a także zapewnienie:

- konkurencyjnych cen energii elektrycznej,
- mniejszego zanieczyszczenia środowiska naturalnego w porównaniu do elektrowni konwencjonalnych,
- rozwoju nowoczesnej i bezpiecznej technologii w Polsce,
- nowych miejsc pracy,
- rozwoju polskich przedsiębiorstw,
- nowych kierunków badań naukowych [10].

Literatura

- [1] History of nuclear energy, U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy, Science and Technology, USA, 2011.
- [2] Glasstone S. i Dolan P.J., The effects of nuclear weapons, United States Department of Defense, Energy Research and Development Administration, USA, 1977.
- [3] <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm>, z dnia 20.07.2012
- [4] The First Reactor, U.S. Department of Energy, Assistant Secretary for Nuclear Energy and Assistant Secretary, Management and Administration, USA, 1982.
- [5] Bainbridge K.T., Trinity, United States Energy Research and Development Administration Contract, USA, 1976.
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Trinity_\(nuclear_test\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Trinity_(nuclear_test)), z dnia 05.07.2012.
- [7] United States Nuclear Tests, July 1945 through September 1992, United States Department of Energy Nevada Operations Office, USA, 2000.
- [8] Skłodowska-Curie M., Promieniotwórczość, reprint wydania z 1939, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
- [9] Warner F., Kirchmann R.J.C., Nuclear test explosions – Environmental and human impacts, Wiley, 2000.
- [10] www.atom.edu.pl z dnia 05.07.2012.
- [11] http://pl.wikipedia.org/wiki/Robert_Oppenheimer, z dnia 20.07.2012.
- [12] <http://www.projekt-manhatan-pl.com/pocztki-programu/>, z dnia 20.07.2012.