

Jerzy Kubowski

BRÓŃ JĄDROWA

FIZYKA – BUDOWA – DZIAŁANIE – SKUTKI

Warszawa 2003

Jerzy Kubowski

BRÓŃ JĄDROWA

fizyka – budowa – działanie – skutki

© Copyright by Jerzy Kubowski, Warszawa 2003

ISBN 83-7204-321-3

Redakcja: Marcin Olifirowicz – red. prowadzący, Joanna Iwanowska

Projekt okładki: Janusz Popławski

Opracowanie techniczne: Marta Pobereszko

Współpraca wydawnicza – Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu



1146

Opracowanie wydawnicze, druk i oprawa: Instytut Technologii Eksploatacji
26-600 Radom, ul. K. Pułaskiego 6/10, tel. 364-42-41, fax 364-47-65
e-mail: instytut@itee.radom.pl <http://www.itee.radom.pl>

SPIS TREŚCI

Przedmowa	6
Objaśnienia oznaczeń i pojęć	8
1. Energia jądrowa i rodzaje broni	10
1.1. Rozszczepienie jąder atomów uranu i plutonu	10
1.2. Materiały rozszczepialne	11
1.3. Reakcja łańcuchowa	14
2. Reakcje syntezy	15
3. Produkcja materiałów jądrowych	16
3.1. Wzbogacanie elektromagnetyczne	17
3.2. Dyfuzja gazu	17
3.3. Wzbogacanie za pomocą wirówki	17
3.4. Destylacja	17
3.5. Elektroliza	18
4. Konstrukcja bomby rozszczepieniowej	19
4.1. Bomba typu artyleryjskie działo	19
4.2. Bomba z urządzeniem implozyjnym	21
4.3. Inicjowanie reakcji rozszczepienia	22
4.4. Zapobieganie przedwczesnej dekompozycji zestawu	23
4.5. Bomba rozszczepieniowa ze wzmacniaczem	25
5. Broń zminiaturyzowana	27
5.1. Bomby małogabarytowe	27
5.2. Broń ręczna	29
6. Konstrukcja bomby wodorowej	32
6.1. Konfiguracja Tellera–Ulama	34
6.2. Historia powstawania bomby termojądrowej w Związku Sowieckim	37
6.3. Wybuch termojądrowej superbomby	41
7. Bomba neutronowa	42
8. Twórcy	44
8.1. Robert Oppenheimer	44
8.2. Edward Teller	45
8.3. Stanisław Ulam	47
9. Perspektywy rozwoju broni czwartej generacji	48
9.1. Broń czwartej generacji a Traktat o Powszechnym Zakazie Prób z Bronią Jądrową	49
9.2. Urządzenia do inercyjnego utrzymywania fuzji (IUF)	50
9.3. Urządzenia podkrytyczne i mikrowybuchy materiałów rozszczepialnych	51
9.4. Pierwiastki transplutonowe i superciężkie	52

9.5. Antymateria	53
9.6. Izomeria jądrowa	53
9.7. Materiały superwybuchowe i metaliczny wodór	54
10. Skutki	55
10.1. Fala uderzeniowa	55
10.2. Promieniowanie ciepłe	56
10.3. Promieniowanie jonizujące	56
10.4. Skażenia promieniotwórcze	57
10.5. Skutki doświadczeń na poligonie atomowym	57
Bibliografia	59

KU PAMIĘCI

„Uwalniając energię atomową, nasze pokolenie dokonało najbardziej epokowego odkrycia od czasu wynalezienia ognia. Ta podstawowa siła tkwiąca we wszechświecie nie przystaje do przestarzałej koncepcji ciasnego nacjonalizmu. Nie ma w niej tajemnic ani przed nią obrony; nie istnieje inna możliwość jej kontroli, jak tylko na drodze zgłębienia o niej wiedzy i wywarcia w tym kierunku presji narodów świata. My, uczeni uznajemy naszą – nie dającą się uniknąć – odpowiedzialność przed współobywatelami za przekazanie im wiedzy o energii atomowej i jej znaczeniu dla społeczeństwa. Nasze jedyne bezpieczeństwo i naszą jedyną nadzieję upatrujemy w świadomym społeczeństwie obywatelskim, działającym na rzecz życia, a nie śmierci”.

Albert Einstein

* * *

„Mamy za dużo ludzi nauki, a za mało ludzi świętych. Posiedliśmy tajemnicę atomu i odrzuciliśmy Kazanie na Górze ...Nasz świat jest światem atomowych mocarzy i moralnie infantylnych ludzi. Wiemy więcej o wojnie niż o pokoju, więcej o zabijaniu niż o życiu”.

*Gen. Omar N. Bradley,
(w latach 1949–1953
przewodniczący Kolegium
Szefów Sztabów Sił
Zbrojnych USA)*

* * *

„Jeśli będziemy prowadzić wojnę i ją wygramy za pomocą bomb wodorowych, to w historii uwiecznione zostaną nie ideały, o które walczyliśmy, lecz metody, którymi osiągnęliśmy je ...”.

Hans A. Bethe

PRZEDMOWA

Epoka broni jądrowej rozpoczęła się nagle, z momentu doświadczalnego wybuchu w amerykańskim stanie Nowy Meksyk 16 lipca 1945 r. Paradoksalnie, siłą napędową jej rozwoju był strach, że bombę atomową, jako pierwsze wyprodukują hitlerowskie Niemcy. Nawet Albert Einstein, który zawsze należał do bezwzględnych przeciwników wojny, podzielał te obawy. W 1952 r., w wywiadzie dla japońskiego wydawnictwa „Kaizo”, tak wyjaśniał swą rolę w pracach nad tą bombą: „...Mój udział w powstaniu bomby atomowej sprowadzał się do jednej czynności: złożyłem podpis pod listem do prezydenta Roosevelta, w którym podkreślałem konieczność przeprowadzenia na wielką skalę doświadczalnych badań nad stworzeniem bomby atomowej. Zdawałem sobie całkowicie sprawę z niebezpieczeństwa, jakie dla ludzkości oznaczało powodzenie tego przedsięwzięcia. Jednakże obawa, iż nad tym zagadnieniem z nadzieją na sukces mogli pracować także Niemcy, zmusiła mnie do poczynienia takiego kroku. Aczkolwiek zawsze byłem przekonany, że pacyfistą, innego wyjścia nie widziałem”.

Przekonać prezydenta nie było łatwo. Dopiero 11 października 1939 r., w drugiej z nim rozmowie, Aleksandrowi Sachsowi, bankierowi i nieoficjalnemu jego doradcy, udało się przekazać mu list Einsteina. Chociaż Europa była już wówczas ogarnięta pożarem drugiej wojny światowej, to jednak amerykańska machina państwowa ukierunkowana na zbudowanie bomby atomowej rozkręcała się powoli. Tylko 6 grudnia 1941 r. prezydent zaaprobował plan prac i przydzielił ze swych funduszy względnie niewielkie środki. Dopiero napad Japonii na bazę marynarki wojennej w Pearl Harbor na Hawajach, który następnego dnia zaskoczył nieprzygotowane do obrony państwo, spowodował mobilizację wszystkich sił Stanów Zjednoczonych w celu stworzenia bomby atomowej.

Przy okazji pięćdziesiątej rocznicy „Hiroszimy” tygodnik „Newsweek” (25 listopada 1991 r.) tak oceniał skutki owego wydarzenia: „...Stany Zjednoczone zostały wstrząśnięte do głębi swej duszy, ich geopolityczna pozycja została zrujnowana, duma poniżona, a wola i charakter wystawione na próbę, jak nigdy dotąd...Szok był galwanizujący. W następstwie pojawił się strach przed nagłym nuklearnym atakiem. To uczucie kształtowało doktrynę obronną USA i jej budżet w ciągu okresu zimnej wojny...”.

Dwa i pół roku gorączkowych prac nad bombą, zakończonych latem 1945 r., przeobraziły energię jądrową w czynnik decydujący o międzynarodowych stosunkach. Świadczyła o tym już deklaracja poczdamska z 27 lipca 1945 r., uchwalona przez USA, Wielką Brytanię i Chiny (ZSRR nie był jeszcze wówczas w stanie wojny z Japonią), żądająca od Japonii bezwarunkowej kapitulacji. W przeciwnym bowiem przypadku groziła jej okrutna kara. Rząd japoński, nieświadom czekający kraj tragedii, nazajutrz ultimatum odrzucił, co stało się bezpośrednim pretekstem do zastosowania bomby atomowej. Prezydent Truman mówił później: „...Zawsze uważałem tę bombę za narzędzie walki i nigdy nie wątpiłem, iż jej użycie jest moim obowiązkiem. Rekomendowali to także najwyżsi doradcy prezydenta, a gdy się poradziłem Churchilla, bez wahania powiedział, że jest za użyciem, jeśli może to przyspieszyć zakończenie wojny...”.

Dzisiejszy stan rozwoju broni jądrowej przekracza wszystko, o czym myśleli jej wielcy twórcy. Pomimo zawieranych traktatów o redukcji tej broni i wysiłków Organizacji Narodów Zjednoczonych w ograniczeniu rozprzestrzeniania, jest ona nadal intensywnie rozwijana i unowocześniana w państwach Klubu Atomowego. Posiadają ją także kraje, których potencjał przemysłowy i naukowy

wydawał się do tego celu nieprzygotowany. Do Klubu kwalifikują się już teraz również Indie, Pakistan, Korea Północna, a pewne rozwijające się państwa stoją na jego progu.

Zasoby tej broni masowego rażenia są przeogromne: głowic jądrowych jest ponad 12000, ogólna liczba ładunków wybuchowych, o skumulowanej energii 5000 Mt, sięga blisko 30000, a liczba głowic w stanie gotowości bojowej wynosi 4600 szt. Ponadto niektóre z wymienionych państw rozporządzają nie tylko bombami atomowymi pierwszej generacji, lecz również termojądrowymi; są na drodze do opanowania produkcji taktycznych bomb neutronowych, tzw. „czystych”.

Coraz głośniejsze mówi się o bombach radiologicznych, zawierających konwencjonalny, chemiczny materiał wybuchowy z dodatkiem pewnej ilości substancji promieniotwórczych, takich jak np. cez-137 lub kobalt-60. Ich niebezpieczeństwo polega na rozprzestrzenieniu skażeń. Wprawdzie nie są tak groźne jak bomby jądrowe, ale w rękach terrorystów mogą się stać czynnikiem oddziaływania psychologicznego.

W popularnonaukowej broszurze przedstawiono podstawowe wiadomości z dziedziny fizyki jądrowej, niezbędne do zrozumienia działania broni oraz metody otrzymywania jądrowych materiałów wybuchowych i ich krytyczne ilości. Podano zasady działania i ideowe rozwiązania konstrukcyjne bomb atomowych, termojądrowych i tzw. „czystych”. Omówiono skutki wybuchów i zakres niebezpiecznego oddziaływania. Sporo uwagi poświęcono nowoczesnym tendencjom rozwoju broni czwartej generacji. W pracy zarysowano historyczne aspekty powstawania broni jądrowej i sylwetki głównych jej twórców.

Autor wyraża swą wdzięczność dr n.t. Jadwidze Jabłońskiej i drowi n.t. Andrzejowi Mikulskiemu za koleżeńską pomoc przy redagowaniu tekstu oraz wnikliwe uwagi merytoryczne, które przyczyniły się do jego udoskonalenia. Wyrazy podziękowania należą się również drowi Jarosławowi Molendzie z Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu za opracowanie wstępnej opinii i cenne uwagi.

OBJAŚNIENIA OZNACZEŃ I POJĘĆ

Alotropia – występowanie tego samego pierwiastka w postaci odmiany dwóch lub kilku substancji, pod wpływem powstawania molekuł o różnej liczbie atomów (np. tlen O_2 (cząstka dwuatomowa) i ozon O_3 (cząstka trójatomowa), lub krystalicznych struktur (np. węgiel w postaciach grafitu i diamentu)).

Bomba neutronowa – rodzaj bomby termojądrowej, której zdolność rażenia polega na emisji intensywnych strumieni neutronów i promieniowania gamma, przy ograniczonym oddziaływaniu fali uderzeniowej (podmuchu) i promieniowania ciepłego. Jest przeznaczona głównie do niszczenia wojsk nieprzyjaciela. Posiada małą siłę burzącą i nie powoduje takich skażeń promieniotwórczych terenu, jak bomba atomowa; stąd nazwa – czysta.

Bomba rozszczepieniowa – bomba, której źródłem energii jest reakcja rozszczepienia jąder atomów, zwana także atomową.

Bomba termojądrowa – bomba, której źródłem energii jest reakcja termojądrowa (fuzja jądrowa). Ponieważ w reakcji biorą udział izotopy wodoru, to nazywa się ją także bombą wodorową.

Efektywność, wydajność ładunku wybuchowego – terminy określające procentowy udział materiału zużytego w procesie wydzielania energii wybuchu.

Inercyjne utrzymywanie fuzji (IUF) – proces szybkiej kompresji termojądrowego paliwa do gęstości kilka tysięcy razy większej od normalnej i utrzymywania go w tym stanie w ciągu nanosekund. Pod koniec kompresji, wskutek konwersji energii fali udarowej (np. z lasera), w centralnej części paliwa powstaje temperatura rzędu 100 milionów $^{\circ}C$, wystarczająca do zainicjowania jądrowej fuzji.

Izotopy – atomy o tej samej liczbie atomowej (liczba dodatnio naładowanych protonów w jądrze), lecz o różnych liczbach masowych (suma protonów i elektrycznie obojętnych neutronów w jądrze). 1_1H – wodór; D – deuter, trwały izotop wodoru (2_1H); T – tryt, promieniotwórczy izotop wodoru (3_1H); 3He , 4He – izotopy helu; 6Li , 7Li – izotopy litu; 8Be , 9Be – izotopy berylu.

J – dżul, jednostka energii, GJ – gigadżul (10^9 dżuli), MJ – mega dżul (10^6 dżuli), kJ – kilodżul (10^3 dżuli); $1J = 6,242 \cdot 10^{18} eV$.

K – stopień Kelwina.

keV, MeV – odpowiednio: kiloelektronowolt, megaelektronowolt; eV – elektronowolt, jednostka energii stosowana w fizyce jądrowej ($1 keV = 1000 eV$; $1 MeV = 10^6 eV$).

kt, Mt – odpowiednio: kilotona, megatona; jednostki energii wybuchu będące równoważnikiem ilości TNT (trinitrotoluen, trotyl); $1 kt = 10^{12} cal = 4,18 \cdot 10^6 MJ = 2,61 \cdot 10^{25} MeV$.

Okres połowicznego zaniku ($T_{1/2}$) – czas, w ciągu którego połowa początkowej liczby jąder ulega samorzutnemu rozpadowi (np. dla Pu-239, $T_{1/2} = 24110 a$, gdzie a – oznacza rok; dla Po-210, $T_{1/2} = 138,38 d$, gdzie d – doba).

Masa krytyczna – minimalna ilość materiału rozszczepialnego, w którym zachodzi samopodtrzymująca się reakcja rozszczepienia.

Masa krytyczna „gola” – masa krytyczna bez reflektora.

Milisekunda, mikrosekunda, nanosekunda – odpowiednio: tysięczna ($10^{-3} s$), milionowa ($10^{-6} s$) i miliardowa ($10^{-9} s$) części sekundy.

Moc wybuchu, termin używany do określenia energii uwalnianej wskutek wybuchu jądrowego.

n, ${}_0^1n$ – neutron.

p – proton.

Paliwo termojądrowe – substancja używana w termojądrowej reakcji, np. deuter, tryt, wodór.

Promieniowanie hamowania – rodzaj promieniowania gamma, które powstaje wskutek spowalniania elektronów (cząstek beta) o dużej prędkości, w procesie oddziaływania na materię.

Promieniowanie jądrowe – różnorodne, przenikliwe promieniowanie, emitowane wskutek rozszczepienia jądra.

Promieniowanie jonizujące – rodzaj przenikliwego promieniowania, w którego wyniku powstają jony – cząsteczki o ujemnym lub dodatnim ładunku elektrycznym.

Promieniowanie komptonowskie – rozpraszanie kwantu promieniowania gamma w procesie oddziaływania m.in. na elektrony, wskutek którego następuje uwalnianie elektronu z orbity atomu i degradacja energii kwantu.

Promieniowanie X – przenikliwe promieniowanie elektromagnetyczne (rentgenowskie), podobne do promieniowania gamma, ale zazwyczaj o mniejszej energii.

Przekrój czynny – miara prawdopodobieństwa zachodzenia określonej reakcji jądrowej.

Reakcja syntezy (fuzja jądrowa) – reakcja łączenia się lekkich jąder w wysokiej temperaturze, stąd nazwa – reakcja termojądrowa; np. reakcja ($D + T \rightarrow He + n$), wskutek której powstaje hel i neutron, oraz wydzielą się energia 17,58 MeV. **(DT)**, **(DD)**, **(D³He)** – odpowiednio oznaczają: tryt, deuter – deuter, deuter – hel.

Reflektor – warstwa metalu otaczająca materiał rozszczepialny, zapobiegająca ucieczce neutronów, co przyczynia się do zmniejszenia masy krytycznej

TPa – terapaskal; przedrostek tera $\equiv 10^{12}$; Pa – jednostka ciśnienia.

${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ itd. – oznaczenie atomu pierwiastka: z lewej strony chemicznego symbolu u dołu – liczba atomowa; z lewej strony u góry – liczba masowa. Ponieważ symbol chemiczny i liczba atomowa są wzajemnie przyporządkowane, więc w uproszczeniu można zapisać: U-235, Pu-239.

Zubożony uran – uran, w którym udział izotopu U-235 jest mniejszy od 0,7%.

1. ENERGIA JĄDROWA I RODZAJE BRONI

W odróżnieniu od innych rodzajów energii, np. chemicznej, która powstaje wskutek oddziaływania elektronów zawartych w otaczających jądro powłokach elektronowych – energia jądrowa jest produktem reakcji zachodzących w jądrach atomów. Istnieją dwa sposoby jej wytworzenia: za pomocą łańcuchowej reakcji rozszczepiania ciężkich jąder (np. atomów uranu lub plutonu) albo termojądrowych reakcji syntezy lekkich jąder. Aczkolwiek w obu przypadkach powstają ogromne ilości energii, to jednak oba procesy, co do swego charakteru, są całkiem odmienne. Łańcuchowa reakcja rozszczepienia zachodzi wyłącznie w materiale rozszczepialnym, którego ilość jest dostateczna do zapewnienia lawinowego narastania – powstałych w jej trakcie – swobodnych neutronów, niezbędnych do samopodtrzymującego procesu rozszczepienia, i praktycznie nie jest zależna ani od temperatury, ani od ciśnienia. Natomiast reakcja termojądrowa zachodzi jedynie w temperaturze rzędu kilkudziesięciu milionów stopni, w wysokim ciśnieniu. Stąd, dla otrzymania takich warunków w bombie termojądrowej, niezbędny jest detonator, np. w postaci ładunku atomowego. Ponadto w reakcjach termojądrowych stosuje się bardziej dostępne i o wiele tańsze pierwiastki chemiczne niż rozszczepialny uran lub pluton. I różnica ostatnia: energia wybuchu termojądrowego jest praktycznie nieograniczona, zależy wyłącznie od ilości użytych w reakcji materiałów, podczas gdy w bombie atomowej wykorzystanie ładunku (w celu zwiększenia energii wybuchu) znacznie przekraczającego masę krytyczną – jest związane z szeregiem poważnych trudności.

W rozwoju broni jądrowej można wyróżnić cztery generacje.

Pierwsza generacja, to bomby uranowe lub plutonowe. Ich technologia jest szeroko znana, a prostota konstrukcji sprawia, iż nie wymagają doświadczeń. Dzisiaj, z punktu widzenia rozpowszechniania, broń ta stanowi największe zagrożenie.

Do drugiej generacji należą urządzenia wybuchowe z busterem termojądrowym i dwustopniowe bomby wodorowe. W tych ostatnich bomba atomowa z inicjatorem eksplozji zawierającym tryt, implodując zapala drugi człon, w którym reakcja syntezy wyzwala największą część energii. Jej rozwój wymaga intensywnych doświadczeń, co doprowadziło do powstania bomb o wydajności: 100–500 kt TNT, w których stosunek energii do ciężaru jest dwudziestokrotnie większy niż w bombach pierwszej generacji.

Trzecia generacja to przede wszystkim broń taktyczna o zwiększonej skuteczności, m.in. bomby tzw. czyste, neutronowe.

Czwarta generacja wykorzystuje atomowe lub jądrowe procesy, które nie są objęte Traktatem o Powszechnym Zakazie Prób z Bronią Jądrową. W przeciwieństwie do broni drugiej generacji, jej rozwój będzie oparty na ostatnich, fundamentalnych osiągnięciach nauki, a także na wyrafinowanych komputerowych technikach symulacyjnych. Oczywiście, wyprodukowanie nowych materiałów wybuchowych będzie o wiele trudniejsze niż plutonu lub wzbogaconego uranu. Broń ta, ze względu na znikomą resztkową promieniotwórczość, będzie posiadać zalety w zastosowaniu taktycznym. Przyniesie także korzyści natury politycznej, ponieważ jej rozwój ograniczy się do krajów o wysokiej technologii.

1.1. Rozszczepienie jąder atomów uranu i plutonu

W wyniku rozszczepienia przez neutron jądra atomu uranu lub plutonu powstaje kilka mniejszych fragmentów, tzw. produktów rozszczepienia oraz dwa lub trzy neutrony. Suma mas owych fragmentów jest mniejsza od masy jądra przed jego rozpadem. Ubytek masy wynoszący ok. 0,1% jest wynikiem jego zamiany na energię, zgodnie z zależnością Einsteina:

$$E = \Delta m c^2 \quad (1)$$

gdzie: Δm – ubytek masy,
 c – prędkość światła.

Ciężkie jądra ulegają rozszczepieniu nie tylko pod wpływem oddziaływania neutronów, lecz także – samorzutnie. Energia przejawia się głównie w postaci kinetycznej energii fragmentów i neutronów (ok. 80%) oraz kwantów promieniowania gamma. Z jednego grama uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$ uzyskuje się ok. 22

MWh energii. Dla porównania podamy, iż w wyniku syntezy 1 g deuteru (${}^2_1\text{H}$) i trytu (${}^3_1\text{H}$) powstaje ok. 94 MWh, a ze spalania 1 g węgla wydziela się ok. $8 \cdot 10^{-6}$ MWh.

Do budowy jądrowych urządzeń wybuchowych używa się przeważnie izotopów uranu i plutonu: ${}_{92}^{235}\text{U}$ i ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Częstokroć stosuje się w nich również rozszczepialny izotop uranu ${}_{92}^{238}\text{U}$, który nie jest wprawdzie materiałem wybuchowym, jednakże odgrywa ważną rolę w procesie podtrzymywania łańcuchowej reakcji. Może być także wykorzystany izotop ${}_{92}^{233}\text{U}$, który otrzymuje się w wyniku reakcji pochłaniania neutronów przez jądra atomów toru ${}_{90}^{232}\text{Th}$.

Izotopy ${}^{235}\text{U}$ i ${}^{239}\text{Pu}$ ulegają rozszczepieniu pod wpływem neutronów o dowolnej energii. Natomiast do rozszczepienia izotopu ${}^{238}\text{U}$ niezbędna jest energia większa od 1,2 MeV. Charakterystyczną jego cechą jest to, iż – z powodu małego przekroju czynnego – nie można z niego stworzyć ładunku, w którym by się rozwijała samopodtrzymująca się reakcja rozszczepienia.

Powstałe z rozszczepienia neutrony wtórne dzielą się na dwie grupy: natychmiastowe i opóźnione. Neutrony natychmiastowe emitowane są w czasie rzędu 10^{-13} s, stanowią ok. 99% wszystkich rozszczepieniowych neutronów; reszta przypada na neutrony opóźnione, które w ciągu 0,1

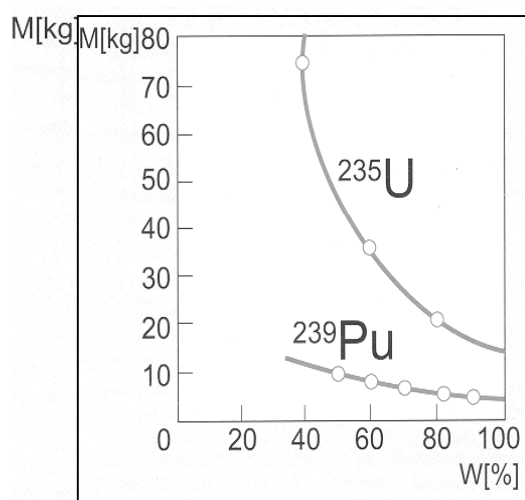
– 100 s powstają w wyniku przemian jądrowych niektórych nuklidów – produktów rozszczepienia.

W następstwie rozszczepienia jądra przez jeden neutron pojawia się – statystycznie rzecz biorąc – 2,5 neutrona. Czas generacji tego nowego pokolenia neutronów, czyli czas życia pokolenia, jest w zasadzie średnim czasem, jaki upływa od momentu narodzin neutronu do momentu jego wychwytu przez jądro w kolejnym akcie rozszczepienia. Czas ten zależny jest od energii neutronu, jak również od konstrukcji urządzenia wybuchowego, w szczególności – od zastosowanego reflektora neutronów, i wynosi w przybliżeniu $l = 3 \cdot 10^{-9}$ s.

1.2. Materiały rozszczepialne

Jakość materiału rozszczepialnego odgrywa bardzo ważną rolę¹. Uran stosowany do wyrobu broni jądrowej jest zazwyczaj wzbogacany do ponad 90% w izotop ${}^{235}\text{U}$. Masa krytyczna tego izotopu o stuprocentowej czystości, w kształcie kuli otoczonej reflektorem wynosi ok. 15 kg. Typowe wartości „gołych” mas krytycznych (tzn. bez reflektora) są następujące: ${}^{233}\text{U}$ – 17 kg; ${}^{235}\text{U}$ – ok. 52 kg; ${}^{239}\text{Pu}$ – ok. 15 kg. Reflektor ogranicza ucieczkę neutronów, a ponadto – przez swą masywność – zwiększa czas, w ciągu którego utrzymuje się stan nadkrytyczny powstałej konfiguracji. W tabeli 1 zestawiono wartości kulistych z reflektorem i bez reflektora. Jak pokazano na rys. 1, w miarę zmniejszania się stopnia wzbogacenia masa uranu szybko się

¹ Z natury niepełnych informacji (z lutego 2003 r.) – pochodzących z utajnionych wyników analiz – wynika, że do budowania broni jądrowej nie jest już potrzebny ani pluton, ani wysokowzbogacony uran, lecz uran o niskiej zawartości U-235, jakiego się powszechnie używa w reaktorach badawczych, czy elektrowniach. Materiał rozszczepiany o wzbogaceniu poniżej 20%, wg zaleceń Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej – z punktu widzenia militarne – jest klasyfikowany jako bezpieczny. Jednakże dzisiejszy stan technologii pozwala budować bomby atomowe nawet z paliwa wypalonego, tzn. wyeksploatowanego, co dotąd uważano za rzecz praktycznie niemożliwą. Do tego celu nadają się zwykle pręty paliwowe, wprawdzie nie bezpośrednio, lecz na drodze ekstrakcji z nich materiału rozszczepialnego. Udowodnili to naukowcy z Los Alamos Laboratory, którzy skonstruowali bombę atomową z niskowzbogaconego uranu. Urządzenie, nadające się do transportu w niewielkim samochodzie, było zdolne do wywołania zniszczeń w promieniu ok. 400 m. Niebezpieczeństwo związane z powstałą sytuacją polega na tym, iż ów materiał nie jest traktowany jako przydatny do zastosowań militarnych. I z tego powodu (w reaktorach cywilnych) nie jest w sposób szczególny chroniony przed ewentualnym wykradzeniem przez terrorystów.



Rys. 1. Zależność mas krytycznych uranu i plutonu (M, kg) od wzbogacenia (W,%) dla kuli z reflektorem berylowym

Tabela 1. Masy krytyczne materiałów rozszczepialnych

Nazwa materiału, masa w kg	Koncentracja izotopu rozszczepialnego w%						
	20	50	60	70	80	90	100
Uran metaliczny ^{235}U , bez reflektora	-	145	105	82	66	54	50
Uran metaliczny ^{235}U , z reflektorem berylowym	250	50	-	-	-	-	15
Pluton metaliczny ^{239}Pu , bez reflektora	-	-	-	23	-	-	15
Pluton metaliczny ^{239}Pu , z reflektorem berylowym	-	-	-	6	-	-	4
Uran metaliczny ^{233}U , bez reflektora	-	-	-	-	-	-	17
Uran metaliczny ^{233}U , z reflektorem berylowym	-	-	-	-	-	-	4 – 5

Tabela 2. Promienie zestawów krytycznych

Materiał rozszczepialny	Promień kuli z reflektorem w cm	
	żelaznym o grubości 15 cm	berylowym o grubości 15 cm
^{235}U (metal)	6,53	5,02
^{239}Pu (metal)	3,80	3,32

zwiększa, w przypadku zaś plutonu wzrost jest znacznie wolniejszy, gdyż reakcja w nim przebiega z większym prawdopodobieństwem. Ładunek wybuchowy z czystego, metalicznego izotopu ^{239}Pu , bez reflektora, jest wielkości pomarańczy, co znacznie upraszcza konstrukcję wybuchowego urządzenia. Z danych zestawionych w tabeli 2 widać, iż rozmiary ładunków są rzeczywiście niewielkie. Ładunek bomby można łatwo przenieść w jednej ręce (rys. 2).



Rys. 2. Herb Lehr, pracownik Specjalnego Działu Mechanicznego organizacji „Projekt Manhattan”, przenosi w przeciwwstrząsowej obudowie ładunek plutonu o wadze 6,1 kg do pierwszej bomby z tego materiału (12 lipca 1945 r.)

(za uprzejmym pozwoleniem „Manhattan Project Heritage Preservation Association”)

Pluton otrzymuje się w wyniku przemian jądrowych, zachodzących w (obficie występującym w przyrodzie) uranie ^{238}U pod wpływem oddziaływania nań neutronów. Można go produkować w specjalnie w tym celu zbudowanych reaktorach, ale – w pokaźnych ilościach – także w reaktorach energetycznych; nazywa się to powielaniem paliwa, gdyż z bezpośrednio nieprzydatnego dla energetyki uranu ^{238}U powstaje pełnowartościowe paliwo. Na przykład reaktor typu czarnobylskiego jest w stanie wyprodukować ponad 150 kg tego materiału. Natomiast z reaktora energetycznego (tzw. lekkowodnego), wraz z paliwem wypalonym, w ciągu roku wyładowuje się ok. 200 kg plutonu.

Okres połowicznego zaniku plutonu – ^{239}Pu wynosi $T_{1/2} = 24110$ a, dlatego izotop ten można gromadzić i, z punktu widzenia promieniotwórczego, traktować jako materiał stabilny. Ze względu na efektywność ładunku wybuchowego, są w nim niepożądane zanieczyszczenia takimi izotopami, jak – ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu i ^{242}Pu , które obok – ^{239}Pu gromadzą się w trakcie zachodzących w uranie – ^{238}U przemian. Wszystkie są rozszczepialne. Można z nich stworzyć „gołe” masy krytyczne. Pluton wyładowany z reaktora może zawierać ok. 2% izotopu – ^{238}Pu , 25% – ^{240}Pu , 15% – ^{241}Pu i 15% – ^{242}Pu , reszta to izotop – ^{239}Pu . Izotopy ^{239}Pu i ^{241}Pu są rozszczepialne przez neutrony o dowolnej energii. Różnica między przekrojem czynnym na rozszczepienie jednego i drugiego jest niewielka, więc „gołe” masy krytyczne są prawie jednakowe: ok. 15 kg (metal, odmiana alotropowa – δ ; ok. 15,9 g/cm³). Rozszczepialny jest również – powstający w małych ilościach – izotop ^{238}Pu , aczkolwiek przy pewnej progowej energii neutronów. Jego przekrój czynny na rozszczepienie przez neutrony o energii ponad 0,5 MeV, jest większy niż izotopu ^{239}Pu , chociaż wydajność neutronów jest mniejsza, to jednak „goła” masa krytyczna (metal, odmiana – δ) również wynosi – 15 kg. Pluton ^{238}Pu , wskutek α - rozpadu przyczynia się do wzrostu temperatury metalicznego plutonu, co prowadzi do zmian w jego strukturze i w konsekwencji utrudnia wybuch ładunku. Natomiast pluton ^{240}Pu stwarza problemy innego rodzaju: po pierwsze, rozrzedza rozszczepialny – ^{239}Pu , a po drugie, – będąc silnym źródłem neutronów z samorzutnego rozpadu – zmniejsza skuteczność wybuchu oraz utrudnia nim sterowanie. Wartość progowa energii neutronów, przy której następuje rozszczepienie izotopu ^{240}Pu , wynosi – kilkaset keV. Jednakże powyżej 1 MeV przekrój czynny na rozszczepienie jest wprawdzie mniejszy niż izotopu ^{239}Pu , ale większy niż ^{235}U . „Goła” masa krytyczna ^{240}Pu (metal, odmiana – δ) jest bliska 40 kg. Jest więc mniejsza od 52 kg w przypadku izotopu ^{235}U o wzbogaceniu 94% (metal o gęstości – 18,7 g/cm³). Zatem, izotop ^{240}Pu jest bardziej efektywnym materiałem rozszczepialnym niż ^{235}U , o wzbogaceniu 94%. Jednakże trzeba pamiętać, iż ta jego względna przewaga nie dotyczy materiałów w postaci dwutlenków. Zarówno bowiem w PuO_2 , jak i w $^{235}\text{UO}_2$, średnia energia neutronów – wskutek rozpraszania przez jądra atomów tlenu – ulega znacznej degradacji. W przypadku izotopu ^{240}Pu pewna część neutronów zostaje przesunięta do zakresu widma, bliskiego progowej energii rozszczepienia – ^{240}Pu , gdzie przekrój czynny na rozszczepienie ^{240}Pu jest mały, podczas gdy przekrój czynny na rozszczepienie ^{235}U przez takie neutrony pozostaje prawie niezmienny. Trzeci z kolei zanieczyszczający izotop ^{241}Pu , chociaż sam jest również doskonałym materiałem rozszczepialnym, powoduje problemy innego gatunku: wskutek beta – rozpadu ($T_{1/2} = 13,2$ a) zamienia się w alfa-promieniotwórczy izotop ameryku ^{241}Am ($T_{1/2} = 458$ a). W ten sposób ^{241}Pu i ^{238}Pu – wskutek generowanego ciepła i helu (w postaci gazowej) – wpływają

na czas przechowywania broni, zmuszając do jej okresowej zamiany². Ostatni izotop ^{242}Pu , w zakresie energii ponad 1 MeV charakteryzuje się przekrojem czynnym na rozszczepienie zbliżonym do wartości dla ^{240}Pu . Jednakże jest od niego mniej efektywny, ponieważ jego progowa energia jest o prawie 100 keV wyższa. „Goła” masa krytyczna izotopu ^{242}Pu (metal, odmiana: δ), określona na podstawie obliczeń, wynosi ok. 177 kg.

Niezależnie od stopnia wypalenia paliwa w lekkowodnym reaktorze energetycznym, wartość masy krytycznej plutonu w nim wyprodukowanego (tzw. plutonu reaktorowego) – leży w przedziale wartości dla ^{239}Pu i ^{235}U .

1.3. Reakcja łańcuchowa

Dla celów ilościowej oceny warunków powstawania samopodtrzymującej się reakcji rozszczepienia można posłużyć się pojęciem współczynnika mnożenia – k :

$$k = (\text{średnia liczba danego pokolenia neutronów}) / (\text{średnia liczba neutronów najbliższego pokolenia poprzedniego}) \quad (2)$$

Załóżmy, iż gęstość neutronów w materiale rozszczepialnym w pewnej chwili wynosi n . Wszystkie one zostaną stracone na drodze wychwytu w różnego rodzaju materiałach lub wskutek ucieczki z układu bądź też spowodują rozszczepienie. W końcu cyklu, zgodnie z definicją współczynnika mnożenia, powstanie ($n \cdot k$) nowych neutronów. Stąd przyrost nowych neutronów wyprodukowanych w ciągu życia pokolenia l , wyniesie: $n(k - 1)$. Z tego wynika, iż zmiana ich gęstości w czasie będzie określona przez równanie:

$$dn / dt = n \cdot (k-1) / l = n \Delta k / l \quad (3)$$

Rozwiązanie tego elementarnego równania kinetyki reakcji łańcuchowej ma postać:

$$n = n_0 \cdot e^{\Delta k (t/l)} \quad (4)$$

gdzie: n_0 – początkowa liczba neutronów,
 t/l – liczba pokoleń powstałych w czasie t .

Zatem, jeśli współczynnik mnożenia jest większy od jedności, liczba neutronów wzrasta wykładniczo.

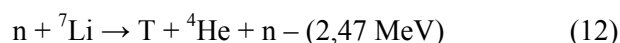
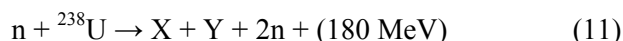
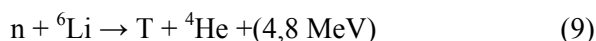
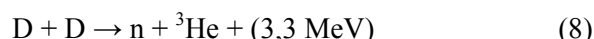
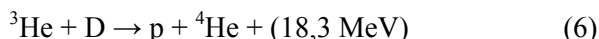
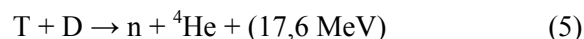
Oczywiście dla $k = 1$, $dn/dt = 0$, co oznacza, że szybkość reakcji rozszczepienia jest stała, czyli liczba neutronów w każdym pokoleniu jest taka sama. Stan taki nazywa się stanem krytycznym. Gdy $k > 1$ występuje stan nadkrytyczny, co przejawia się w ciągłym narastaniu reakcji. Natomiast w sytuacji, gdy $k < 1$, reakcja zanika – tzn. stan jest podkrytyczny.

Rozszczepienie $1,45 \cdot 10^{23}$ jąder lub całkowite rozszczepienie 56 g materiału rozszczepialnego jest równoważne energii wyzwolonej w wyniku wybuchu 1 kt trotylu. Stąd wynika, że dla zdetonowania bomby o energii 20 kt potrzeba $2,9 \cdot 10^{24}$ aktów rozszczepień, czemu odpowiada taka sama liczba neutronów. Jeśli $n_0 = 1$, to na podstawie wzoru (4), dla $k = 2$ otrzymamy: $t/l = 56$ pokoleń. Podobnie: dla wyzwolenia energii 200 kt – potrzeba $2,9 \cdot 10^{25}$ aktów rozszczepień, które powstają w czasie 58 pokoleń. Stąd wynika, że 99,9% energii wybuchu generuje się w czasie ostatnich 4 pokoleń, czyli w ciągu – 0,012 mikrosekund.

² Np. w Związku Sowieckim zamianę plutonu w głowicach przeprowadzano co 6–10 lat.

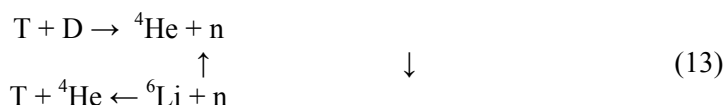
2. REAKCJE SYNTEZY

Reakcja syntezy, zwana także termojądrową, zachodzi między dwoma lekkimi jądrami. W jej wyniku powstają jądra cięższe i m.in. neutrony, protony i inne elementarne cząstki, a także tryt. Wyzwala się przy tym pewna ilość energii w postaci kinetycznej energii nowo powstałego jądra oraz pozostałych cząstek. W odniesieniu do jednostki masy jest ona większa od energii reakcji rozszczepienia. Wydajność jest zależna od temperatury i gęstości. Im wyższa temperatura i gęstość paliwa termojądrowego, tym jego spalanie jest szybsze. Wymaga ono ogromnej temperatury (ok. 10^7 K)³ i jednocześnie ciśnienia rzędu wielkości – 100 TPa, czyli 10^9 atm. Z punktu widzenia militarnego, do najważniejszych reakcji należą:



[Oznaczenia: D – deuter (${}^2_1\text{H}$); T – tryt (${}^3_1\text{H}$); p – proton; X i Y – fragmenty rozszczepień]

W istniejącej w bombie temperaturze termojądrowa reakcja (5) przebiega 100-krotnie szybciej niż reakcje (7) i (8), które z kolei są 10-krotnie szybsze od reakcji (10). Należy podkreślić, iż z punktu widzenia uwolnienia energii najbardziej cennymi reakcjami syntezy są: (5) i (6). Reakcje (10) i (11) nie są reakcjami termojądrowymi. Są to reakcje neutronowe takie, jakie zachodzą przy rozszczepieniu. Reakcja (9) nie wymaga neutronów o zbyt wysokich energiach, natomiast do przebiegu reakcji (10) potrzebne są neutrony o energiach ponad 4 MeV. Najbardziej energetyczny neutron (14,06 MeV) powstaje z reakcji (5), natomiast energia neutronu z reakcji (8) wynosi 2,45 MeV. Produktem reakcji (9) jest tryt ($T_{1/2} = 12,3$ a). Stanowi ona podstawową reakcję, umożliwiającą w wysokowydajnej bombie wodorowej produkcję trytu in situ i spalanie w ten sposób – zawartego w paliwie – deuteru i litu. W broni termojądrowej paliwo początkowo zawiera zestalony lit z domieszką deuteru (LiD), o gęstości $0,8 \text{ g/cm}^3$, w normalnych warunkach temperatury i ciśnienia. Przy odpowiednich wartościach temperatury i ciśnienia, reakcje (5) i (9) tworzą układ sprzężony, zwany cyklem Jettera:



W czasie spalania paliwa, wskutek neutronów będących produktem reakcji (13), cykl ten narasta wykładniczo. Dla skompensowania strat neutronów i podtrzymania cyklu na wysokim poziomie wydajności stosuje się powielacz neutronów (np. w postaci otaczającego plazmę uranowego płaszcza), który dzięki reakcjom $n,2n$ pozwalałby otrzymywać dodatkowe neutrony.

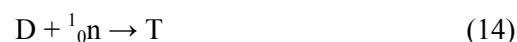
³ W temperaturze 10^7 K energia kinetyczna ruchu termicznego wynosi $2,1 \cdot 10^{-16}$ J na cząstkę, co odpowiada 1,3 keV.

3. PRODUKCJA MATERIAŁÓW JĄDROWYCH

Do najważniejszych materiałów, niezbędnych przy produkcji broni jądrowej, należą izotopy bardzo specyficznych pierwiastków. Niektóre z nich występują w przyrodzie, w mieszaninie innych izotopów tego samego pierwiastka, jak np. ^{235}U . Jego udział w uranie naturalnym jest bardzo niewielki, stanowi bowiem zaledwie 0,714%, większość przypada na ^{238}U , resztę zaś – w ilości śladowej – dopełnia ^{234}U (0,0057%). Fakt znajdowania się w kopalinach izotopu ^{235}U należy zawdzięczać bardzo długiemu okresowi połowicznego zaniku ($T_{1/2} = 7 \cdot 10^8$ a). W większych ilościach otrzymuje się go za pomocą różnorodnych technik wzbogacania.

Natomiast takie izotopy, jak ^{233}U lub ^{239}Pu , o krótszych okresach połowicznego zaniku, występują w przyrodzie w ilościach śladowych. Produkuje się je w reaktorach, gdzie powstają wskutek oddziaływania neutronów na tzw. paliworodne izotopy: ^{232}Th i ^{238}U .

W reaktorach wytwarza się również ważny z punktu widzenia reakcji termojądrowej – tryt. Jest to promieniotwórczy izotop wodoru. W wyniku beta-rozpadu przemienia się on w hel – ^3_2He . Pierwiastkami wyjściowymi do jego otrzymywania są: deuter, lit, bor lub azot. Reakcje oddziaływania na nie neutronów (^1_0n) mają postać:



Wszystkie izotopy tego samego pierwiastka posiadają takie same własności chemiczne. Dlatego właśnie do ich separacji zamiast metod chemicznych, stosuje się metody wykorzystujące różnice ich mas atomowych. Ponieważ wydajność stosowanych metod jest bardzo mała, przeto proces wzbogacania jest wielostopniowy. Na każdym etapie używa się produktu z poprzedniego etapu, tworząc w ten sposób system kaskadowy. Spośród wielu metod wzbogacania do najważniejszych należą:

- rozdzielanie elektromagnetyczne,
- dyfuzja gazowa,
- rozdzielanie za pomocą centryfugi,
- destylacja,
- elektroliza.

3.1. Wzbogacanie elektromagnetyczne

Technika ta polega na separowaniu strumienia zjonizowanych atomów w urządzeniu zwanym – kalutronem⁴, który w zasadzie (w powiększonej skali) jest spektrografem masowym. Podstawa działania jest następująca. Gazową mieszaninę, z której ma się wyodrębnić izotopy danego pierwiastka, poddaje się jonizacji za pomocą elektrycznych wyładowań. Jony przechodząc kolejno przez dwie szczeliny ulegają przyśpieszeniu w polu elektrycznym. Na wyjściu dostają się pod wpływ pola magnetycznego, gdzie zataczają półkole w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku sił tego pola. Ponieważ promienie ich trajektorii są proporcjonalne do iloczynu masy przez prędkość, to lekkie jony poruszają się po okręgach o mniejszych promieniach niż jony ciężkie. W końcowej fazie gromadzą się one na oddzielnych kolektorach⁵.

3.2. Dyfuzja gazu

Stosuje się ją praktycznie do rozdzielania izotopów o znaczących różnicach mas. Molekuły gazu lub cieczy znajdują się w ciągłym ruchu, a ich średnia energia kinetyczna jest zależna wyłącznie od temperatury. Cząstki posiadające różne masy, ale jednakową energię kinetyczną, poruszają się z różnymi prędkościami. Przy tym lekka molekula będzie miała średnią prędkość większą niż molekula ciężka. Właściwość tę wykorzystuje się w procesie dyfuzji. W rzeczywistości nawet jednakowe molekuly mogą posiadać znaczne różnice prędkości, co sprawia, że proces jest mało wydajny i wymaga wzbogacania kaskadowego.

Metoda polega na przepuszczaniu gazu pod ciśnieniem poprzez porowate przegrody. Molekuły lżejsze, posiadające większe prędkości niż cięższe, przechodzą przez przegrody szybciej. W efekcie w pozostałej mieszaninie, która na pewnym etapie nie przeniknęła przez przegrody – koncentracja molekul ciężkich ulega zwiększeniu. Jedynym gazowym związkami uranu, do którego można tę technikę stosować, jest sześćfluorek uranu.

Od czasu wybudowania pierwszego zakładu wzbogacania uranu w 1945 r. metoda dyfuzji była powszechnie stosowana. Aczkolwiek pod koniec lat siedemdziesiątych, w nowych przedsiębiorstwach została ona wyparta przez metodę wirówki. Jednakże stare instalacje ciągle jeszcze wykorzystuje się w największych zakładach wzbogacania na świecie.

3.3. Wzbogacanie za pomocą wirówki

Aczkolwiek centryfugowanie zostało wynalezione w Niemczech w czasie drugiej wojny światowej, to jednak technika ta aż do 50–60 lat zastosowania nie znalazła. Pod wpływem siły odśrodkowej zawarte w mieszaninie gazowej lżejsze i cięższe izotopy rozdzielają się i odkładają w niezależnych warstwach. Technika nadaje się zarówno do pierwiastków ciężkich, jak i lżejszych. Pożądane jest, by urządzenie posiadało możliwie wysoką prędkość. Typowa wartość jest większa od prędkości dźwięku (>330 m/s). W udoskonalonych konstrukcjach przekracza ona 600 m/s, a nawet 1100 m/s. W porównaniu z metodą dyfuzji, wzbogacanie za pomocą wirówki jest procesem wydajniejszym, chociaż także musi być wielostopniowe. Ponadto centryfugowanie zużywa znacznie mniej energii niż technika wzbogacania dyfuzyjnego, a i rozmiary urządzenia są o wiele mniejsze. Dzisiaj wzbogacanie uranu oparte na wirówkach jest dominującym rozwiązaniem stosowanym w nowych zakładach na świecie.

3.4. Destylacja

Proces odbywa się w wieżach, do których dolnych przestrzeni doprowadza się parę, a do górnych – ciecz. Między parą a cieczą następuje molekularna wymiana, dzięki której substancja o niższej temperaturze wrzenia zamienia się w parę i na odwrót. W ten sposób na drodze wielokrotnej destylacji

⁴ Prototyp kalutronu opracował E.E. Lawrence w 1941 r., w czasie realizacji „Projektu Manhattan”. Nazwę angielską – „calutron” nadano na cześć California University. Wydajność wynosiła ok. 1 mikrograma ²³⁵U na godzinę.

⁵ W USA pod koniec 1944 r. zakłady wzbogacania elektromagnetycznego osiągnęły wydajność – 90 g/dzień uranu wzbogaconego do 80%; do lipca 1945 r. wyprodukowano ok. 40 kg, ilość dostateczną dla skonstruowania bomby.

można dokonać rozdzielania wody ciężkiej od lekkiej. Ciężar cząsteczkowy H_2O jest równy 18, wody ciężkiej zaś (D_2O) – 20. Różnica znacząca, co przejawia się we wzroście temperatury wrzenia wody ciężkiej o $1,4^\circ\text{C}$.

3.5. Elektroliza

Jeśli wodę naturalną poddać elektrolizie, to wodór będzie się wydzielać na elektrodzie ujemnej szybciej niż deuter, którego zawartość w wodzie naturalnej wynosi ok. 0,015%. Tym sposobem odbywa się wzbogacanie wody w deuter. Stosując wielokrotną operację, można doprowadzić wzbogacenie do 99%.

4. KONSTRUKCJA BOMBY ROZSZCZEPIONIOWEJ

Przy projektowaniu bomby rozszczepieniowej trzeba rozwiązać kilka podstawowych problemów:

- 1) utrzymanie materiału rozszczepialnego w stanie podkrytycznym przed wybuchem,
- 2) stworzenie stanu nadkrytycznego przy minimalnym oddziaływaniu neutronów,
- 3) wprowadzenie źródła neutronów do zestawu w warunkach optymalnej konfiguracji, tzn. w stanie maksymalnie nadkrytycznym,
- 4) utrzymanie mas w stanie złączonym do czasu, aż znaczna ich część ulegnie rozszczepieniu.

Ze względu na nieuniknioną obecność naturalnego tła neutronów spełnienie warunków 1), 2) i 3) jest zadaniem wielce skomplikowanym. Produkcja neutronów wskutek oddziaływania promieniowania kosmicznego jest bardzo mała. Główny udział w tle posiadają neutrony z samorzutnego rozpadu samego materiału rozszczepialnego.

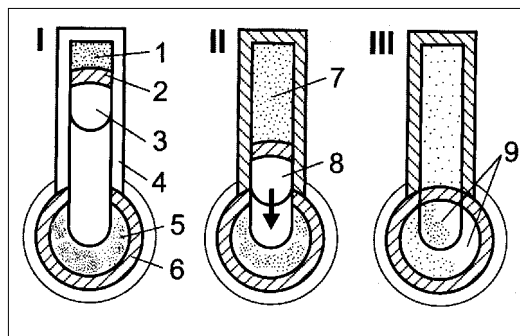
Proces tworzenia masy nadkrytycznej musi przebiegać w ciągu znacznie krótszego czasu, niż wynosi średni okres między aktami samorzutnego rozszczepienia. Jest to trudne do spełnienia, jeśli zważyć, iż w momencie przejścia ze stanu podkrytycznego do krytycznego współczynnik mnożenia ulega wielkiemu przyrostowi. Czas potrzebny do zmiany współczynnika od wartości: $k = 1$ do maksymalnej wartości $k = 2$, lub zbliżonej, nazywa się czasem złączania. Problem komplikuje także mnożenie neutronów w stanie podkrytycznym. Jeśli układ podkrytyczny charakteryzuje się współczynnikiem $k = 0,9$, to wówczas – średnio biorąc – pojedynczy neutron spowoduje reakcję łańcuchową, która wygasa po 10 pokoleniach neutronów. W przypadku zaś, gdy $k = 0,99$ – reakcja łańcuchowa trwa w ciągu 100 generacji. Zatem obecność neutronów z samorzutnego rozpadu skraca czas potrzebny do złączenia mas i wymaga, by przyrost współczynnika od wartości $k = 0,9$ do $k = 2$ nastąpił w tym przedziale.

Podstawowa trudność w rozwiązywaniu problemów 1) i 2) polega na tym, iż masa krytyczna (lub podkrytyczna) jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu gęstości materiału rozszczepialnego. Możliwość zwiększenia gęstości w sposób gwałtowny rozwiązuje problem szybkiego przyrostu współczynnika mnożenia, co jest warunkiem wywołania eksplozji. Generalną zasadą jest, by w stanie wysokonadkrytycznym masa była co najmniej trzykrotnie większa od masy o tej samej gęstości i kształtu, znajdującej się w stanie podkrytycznym. W ten sposób podwojenie gęstości w stanie lekko podkrytycznym (tzn. stworzenie blisko czterokrotnie większej masy krytycznej) umożliwia w dostatecznym stopniu do wywołania eksplozji bomby – zwiększyć współczynnik mnożenia. Ideę tę zrealizowano w dwóch konstrukcyjnych wariantach: zestawie implozyjnym i urządzeniu działającym na zasadzie artyleryjskiego działa. Zastosowanie zjawiska implozji pozwala na znaczne skrócenie czasu złączania, natomiast w bombie typu dział, jest on o wiele dłuższy. Technologie, wykorzystujące obie te konstrukcje, legły u podstaw pierwszej generacji broni jądrowej. Dzisiaj – z punktu widzenia rozprzestrzeniania – broń ta, ze względu na swą prostotę, stanowi największe zagrożenie.

4.1. Bomba typu artyleryjskie dział

Idea scalania materiału rozszczepialnego w celu uzyskania masy krytycznej za pomocą wstrzeliwania jednego ładunku materiału rozszczepialnego do drugiego stała się podstawą konstrukcji bomb atomowych na pierwszym etapie ich rozwoju.

Aby zrozumieć, jak to się dzieje, że ze złączonych dwóch podkrytycznych mas powstaje zestaw równoważny trzem masom krytycznym, przeprowadzimy rozumowanie następujące. Wyobraźmy sobie zestaw złożony z trzech – bliskich stanowi krytycznemu – mas. Usuńmy z jego wnętrza część centralną w postaci masy bliskiej stanowi krytycznemu. Ponieważ wewnątrz wytworzyła się pusta przestrzeń, więc skuteczna gęstość zestawu została zredukowana do $2/3$ początkowej gęstości. Układ składa się teraz z dwóch mas krytycznych, a jego zmniejszona gęstość powoduje dalszy ubytek masy o $(2/3)^2 = 4/9$. W ten sposób w układzie pozostała tylko $2 \cdot (4/9) = 8/9$ część masy krytycznej. Złączenie dwóch podkrytycznych części odbywa się za pomocą wystrzelenia jednej z nich – z lufy – do puste, centralnej wnęki zestawu (rys. 3).



Rys. 3. Konstrukcja i zasada działania bomby typu – artyleryjskie działo:
 (I – stan początkowy, II – po wybuchu detonatora, III – złączenie mas); 1 – detonator chemiczny, 2 – reflektor neutronów, 3 – „pocisk” z materiału rozszczepialnego, 4 – „lufa”, 5 – materiał rozszczepialny, 6 – reflektor neutronów, 7 – gazy, po wybuchu detonatora, 8 – „pocisk” w ruchu, 9 – złączenie materiałów rozszczepialnych

Czas złączania jest długi – wynosi ponad 1 milisekundę. Taką budowę miała pierwsza uranowa bomba zrzucona na Hiroszimę 6 sierpnia 1945 r.

Najważniejszą cechą bomby tego typu jest prostota konstrukcji. Natomiast wadami są:

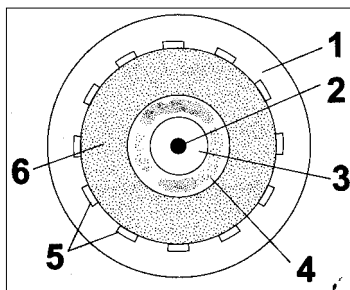
- brak kompresji, co wymaga względnie wielkiej ilości materiału rozszczepialnego i daje małą wydajność;
- z powodu długiego czasu złączania do budowy można użyć jedynie izotopu ^{235}U (i prawdopodobnie także ^{233}U);
- masa i długość „lufy” sprawiają, że bomba staje się ciężka i ma duże rozmiary.

4.2. Bomba z urządzeniem implozyjnym

Zjawisko implozji⁶ powstaje podczas kompresji podkrytycznej masy materiału rozszczepialnego w postaci kulistej lub – rzadziej – cylindrycznej, za pomocą specjalnie wykonanych wysokowybuchowych materiałów chemicznych. Jest ono wywołane detonacją materiału wybuchowego, rozmieszczonego na zewnętrznej powierzchni ładunku rozszczepialnego w ten sposób, że fala uderzeniowa zostaje skierowana w jego kierunku. Właściwie wykonana konstrukcja pozwala uzyskiwać symetrycznie ukształtowaną falę, która działając na ładunek rozszczepialny powoduje jego kompresję i w rezultacie – wzrost gęstości w stopniu dostatecznym do powstania stanu nadkrytycznego. Współczynnik kompresji uranu lub plutonu (w postaci stałej) osiąga wartości od 2 do 3.

Technikę implozji stosuje się zarówno w przypadku ładunków rozszczepialnych w postaci jednorodnej, jak i do zestawów z pustą częścią centralną, otoczoną materiałem rozszczepialnym w kształcie skorupy, którą fala uderzeniowa wciska do pustej wnęki, powodując wzrost gęstości. Wysoko wydajne chemiczne materiały wybuchowe generują fale o ciśnieniu 400 kilobarów, a użycie technologii bardziej wyrafinowanej pozwala osiągać wartość kilku megabarów. Proces kompresji jest bardzo szybki. Typowe wartości czasów złączenia leżą w granicach od 1 do 4 mikrosekund.

Przy współczynniku kompresji – 2 lekko podkrytyczna masa przemienia się w prawie cztery masy krytyczne. Tego typu rozwiązanie zastosowano do bomby plutonowej, zrzuconej na Nagasaki 9 sierpnia 1945 (rys. 4). W późniejszym okresie technika implozji, dzięki zastosowaniu tzw. zasady „lewitacji”, została w poważnym stopniu usprawniona. W bombie „Fat Man” (rys. 5) zarówno wybuchowy materiał chemiczny,



Rys. 4. Konstrukcja bomby zrzuconej na Nagasaki

1 – kadłub, 2 – inicjujące źródło neutronów, 3 – materiał rozszczepialny, 4 – reflektor neutronów, 5 – działające jednocześnie detonatory, 6 – chemiczny materiał wybuchowy



Rys. 5. Bomby zrzucone na Hiroszimę [z lewej – „Little Boy” (średnica: 71 cm, długość: 304,8 cm, ciężar: 4037 kg, energia: 15–16 kt)⁷] i Nagasaki [z prawej „Fat Man” (śr.: 253 cm, dł.: 325 cm, ciężar: 4672 kg, energia: 21 kt)]
(za uprzejmym pozwoleniem „National Atomic Museum”)

⁶ Zastosowanie tego zjawiska do technologii budowy bomby atomowej zaproponował Seth Neddemeyer, fizyk z Los Alamos, w 1943 r.

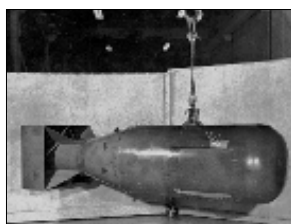
⁷ 1 kt = 10^{12} cal = $4,18 \cdot 10^6$ MJ = $2,61 \cdot 10^{25}$ MeV.

jak i masywna obudowa przylegały bezpośrednio do plutonowej kuli. „Lewitacja” polega na wprowadzeniu szczeliny między materiałem wybuchowym a otaczającymi go warstwami, co pozwala implodującej obudowie osiągać ogromne szybkości przed uderzeniem w materiał rozszczepialny. Rozwiązanie takie znacznie polepsza kompresję ładunku rozszczepialnego i wydajność bomby.

Oprócz wspomnianych zalet przy doprowadzaniu zestawu do stanu nadkrytycznego zastosowanie kompresji posiada inny ważny efekt. Mianowicie: wzrost gęstości materiału powoduje skrócenie średniej drogi swobodnej neutronu, gdyż jest ona odwrotnie proporcjonalna do gęstości. W następstwie tego czas generacji neutronów w każdym pokoleniu ulega zmniejszeniu, co sprzyja powstawaniu większej gęstości rozszczepień, zanim nastąpi dekompozycja zestawu. Zatem implozja zwiększa znacznie skuteczność działania bomby.

Podstawowymi zaletami techniki implozji są:

- a) duża szybkość scalania zestawu, co pozwala stosować materiały o znacznej liczbie samorzutnych rozszczepień;
- b) możliwość uzyskiwania dużych gęstości materiału, a co zatem idzie bardzo dużych energii eksplozji, przy względnie małej jego ilości;
- c) obniżenie ciężaru urządzenia wybuchowego; w najlepszych konstrukcjach do kompresji zestawu używa się zaledwie kilka kilogramów chemicznego materiału wybuchowego.

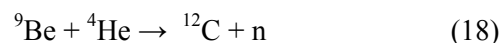


Rys. 6. „Little Boy”
(za uprzejmym pozwoleniem „National Atomic Museum”)

4.3. Inicjowanie reakcji rozszczepienia

Drugim problemem, obok zagadnienia scalania podkrytycznych mas w układ nadkrytyczny, jest zapewnienie rozpoczęcia reakcji w najbardziej odpowiednim momencie. Jedną z alternatyw jest utrzymywanie masy w stanie nadkrytycznym do czasu, gdy powstałe z samorzutnego rozpadu neutrony ją zapoczątkują. Można to zrealizować za pomocą urządzenia pracującego na zasadzie działa. Jednakże tego rodzaju inicjowanie reakcji nie nadaje się w przypadku stosowania do procesu scalania techniki implozji, ponieważ poddany wysokiemu ciśnieniu układ, wkrótce po zaniku fali uderzeniowej, zaczyna się rozszerzać. Nawet w tych warunkach reakcja rozszczepienia zaczyna się zaledwie po ok. 250 nanosekundach, co w przybliżeniu odpowiada okresowi trwania maksymalnej kompresji. Stąd powstaje konieczność zainicjowania reakcji łańcuchowej dopiero po osiągnięciu maksymalnej kompresji lub nawet chwilę przed tym.

Lepszą metodą jest zastosowanie źródła neutronów, którego działanie zostaje dokładnie zsynchronizowane z procesem łączenia mas. W tym celu opracowane zostały trzy rodzaje źródeł, oparte na reakcjach oddziaływania naładowanych cząstek na materiały, w których wyniku powstają neutrony. Pierwszy rodzaj wykorzystuje właściwość izotopu berylu ^9Be względnie łatwego uwalniania neutronu. W rezultacie oddziaływania nań – pochodzących z promieniotwórczych izotopów – cząstek alfa, neutrony powstają w wyniku reakcji:



Reakcja zachodzi zaledwie w 0,008% zderzeń. Stąd uzyskanie – potrzebnego dla bomby implozyjnej – strumienia neutronów wymaga posiadania silnego alfa-emitera, np. izotopu polonu ^{210}Po . Do zainicjowania reakcji w sposób natychmiastowy potrzebne jest źródło o wydajności 10^7 – 10^8 neutronów na sekundę, co odpowiada 10^{11} – 10^{12} aktom alfa-rozpadów. Kapsułę ze źródłem rozruchowym umieszcza się w środku zestawu. Potrzebna jest dość wymyślna konstrukcja, by beryl i alfa-emiter do czasu ich natychmiastowego połączenia pod wpływem implozji można było trzymać oddzielnie. W początkowym okresie ten typ źródła używano we wszystkich broniach jądrowych. Kłopot ze stosowaniem źródła opartym na reakcji (18) wiąże się z bardzo krótkim czasem połowicznego zaniku izotopu ^{210}Po ($T_{1/2} = 138,38$ d), wymaga to bowiem ciągłej, okresowej jego wymiany. Do tego dochodzi trudność dokładnego zmieszania berylu z polonem, a co zatem idzie – również precyzyjnego kontrolowania momentu inicjowania reakcji rozszczepienia. Źródła tego typu mają tendencję do rozpoczynania reakcji z pewnym opóźnieniem w stosunku do warunków optymalnych.

Innym źródłem – jakby to nie było dziwne – może się stać implozja, podczas której w centralnej części zestawu powstaje na tyle wysoka temperatura, iż pojawiają się warunki dla reakcji syntezy DT. Do wygenerowania na tej drodze niezbędnej do rozruchu liczby neutronów potrzebne jest niezmiernie mało aktów reakcji syntezy, a stąd – małej ilości gazowej mieszaniny (DT). Wszakże skonstruowanie takiego typu źródła neutronów jest o wiele trudniejsze niż źródła $\text{Be} - ^{210}\text{Po}$, gdyż ze względu na wymagania odnośnie do symetrycznego rozkładu temperatury proces implozji musi być bardzo precyzyjny. Największą jego zaletą jest, iż unika się w ten sposób stosowania krótkożyciowego izotopu ^{210}Po . Doskonalsze rozwiązanie konstrukcyjne źródła opiera się na elektronicznie kontrolowanym akceleratorze cząstek. Urządzenie jest zdolne do generowania dużych strumieni neutronów, które powstają z reakcji syntezy (DT) lub (DD). Krótkotrwały impuls wysokiego napięcia przyspiesza jądra deuteru lub trytu do tego stopnia, iż uzyskują one energię dostateczną do wywołania w tarczy z deuteru lub trytu reakcji syntezy. Ponieważ powstaje przy tym duża liczba neutronów, położenie generatora w zestawie może być dowolne, pod warunkiem by dostateczna ich liczba przenikała do rozszczepialnego ładunku. Ten typ rozruchowego źródła neutronów jest stosowany w większości nowoczesnych konstrukcji broni jądrowej.

4.4. Zapobieganie przedwczesnej dekompozycji zestawu

Wskutek rozszczepienia znacznej części masy, jej temperatura wzrasta na tyle, że układ rozszerza się w stopniu powodującym wygaśnięcie reakcji w ciągu zaledwie kilku pokoleń neutronów. Zmniejsza to znacznie wydajność broni z ładunkiem rozszczepialnym. Praktycznie efektywność tej broni jest ograniczona do ok. 25% lub nawet do mniejszej wartości. Bomba implozyjna, zrzucona na Nagasaki („Fat Man”) miała wydajność 17% (uwzględniając energię z rozszczepienia masy plutonu, udział rozszczepień uranu naturalnego w otaczającym ładunek płaszczu wynosił dodatkowo 4%). Natomiast bomba uranowa zrzucona na Hiroszimę („Little Boy”) posiadała wydajność zaledwie 1,4%. Wydajność dużych bomb rozszczepieniowych sięga 50%, ale zostały one wyparte przez bomby termojądrowe. Nawet nieznaczne zwiększenie okresu utrzymywania ładunku w stanie złączonym lub zmniejszenie czasu życia pokolenia neutronów, może prowadzić do znacznego zwiększenia energii wybuchu. Wzrost wydajności – o czym już wspomniano – w największym stopniu należy zawdzięczać technice implozji. W rezultacie bowiem dwukrotnego wzrostu gęstości ładunku czas życia neutronów skraca się o połowę, co – tuż przed zanikiem reakcji wskutek ekspansji termicznej – przyczynia się w takim samym prawie stopniu do wzrostu liczby rozszczepień. Innym sposobem zwiększenia wydajności jest spowolnienie ekspansji przez stworzenie lepszego mechanizmu wydłużenia czasu utrzymywania masy krytycznej w stanie złączonym. W tym celu ładunek rozszczepialny otacza się warstwą materiału o wysokiej gęstości właściwej, np. zubożonego uranu lub wolframu. W czasie kompresji spełnia ona zarazem funkcję tłoka – posuwa materiał rozszczepialny ku centrum. „Goła” masa krytyczna nie rozszerza się jednakowo we wszystkich kierunkach. W centralnej części materiał ściskany przez warstwy zewnętrzne w chwili początkowej się nie rozszerza. Natomiast brak wywieranego przez „tłok” ciśnienia na zewnętrzną powierzchnię wywołuje w tym obszarze natychmiastową, gwałtowną ekspansję. Materiał odrzucany z szybkością naddźwiękową na zewnątrz umożliwia przesuwanie się procesu w głąb.

„Tłok” poprawia mechanizm utrzymywania masy krytycznej w stanie złączonym w dwojaki sposób. Po pierwsze, fala uderowa przenikając przez ciężki materiał „tłoka” wytraca część swej energii, co znacznie zmniejsza stopień rozszerzania się materiału. Po wtóre, warstwa „tłoka” na styku z powierzchnią materiału rozszczepialnego rozgrzewając się wywiera na nią nacisk, opóźniając dekompozycję zestawu. Ponadto „tłok” posiada jeszcze tę zaletę, iż przez rozpraszanie neutronów w kierunku materiału rozszczepialnego zapobiega ich ucieczce z układu. Spełnia więc rolę reflektora, dzięki czemu zmniejsza się w pewnym stopniu ilość materiału, zużywana do wytworzenia masy krytycznej.

4.5. Bomba rozszczepieniowa ze wzmacniaczem

Koncepcja wzmacniacza zapłonu (bustera) opracowana została na początku lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Korzyści z jego wdrożenia okazały się tak znaczne, iż stosowany jest we wszystkich nowoczesnych bombach jądrowych. Wykorzystana przy tym idea sięga maja 1941 r., kiedy to Takutaro Hagiwara, fizyk z uniwersytetu w Kioto, w swym wykładzie przedstawił teorię wytworzenia reakcji syntezy jąder wodoru za pomocą wybuchu uranu ^{235}U pod wpływem reakcji łańcuchowej. We wrześniu tego samego roku Enrico Fermi w Uniwersytecie Columbia wyłożył Edwardowi Tellerowi analogiczną koncepcję. Dyskusje z E. Fermim natchnęły go do wieloletnich, owianych mesjanizmem, wysiłków zbudowania termojądrowej „superbomby”. Wiosną 1946 r. podczas prac nad tą bombą przedstawiony został nowy pomysł – jak się okazało później – o wyjątkowym znaczeniu. Mianowicie, Klaus Fuchs we współdziale Johna von Neumanna zaproponował zastosować w „superbombie” inny system inicjowania reakcji, wykorzystując w tym celu dodatkowy, drugi stopień zapłonu, zawierający ciekłą mieszaninę (DT). W owym związku pod wpływem kompresji i temperatury powstałej w wyniku promieniowania emitowanego z członu pierwszego zachodziła reakcja syntezy. E. Teller, będąc uczestnikiem wymiany poglądów na temat możliwych, konstrukcyjnych wariantów bomb atomowych o zwiększonej wydajności, już w 1942 r. przedstawił ideę bomby autokatalitycznej. Zaproponował, by wewnątrz materiału rozszczepialnego umieścić pochłaniacz neutronów na osnowie izotopu boru – ^{10}B . Sądził, iż w wyniku różnicy ciśnień, będącej skutkiem jonizacji substancji o różnych liczbach elektronów w atomach – podczas procesu wybuchu jądrowego nastąpi kompresja tego izotopu. W konsekwencji zmaleje pochłanianie neutronów, co zintensyfikuje reakcję łańcuchową w stanie nadkrytycznym i zwiększy wydajność bomby. Doprowadziło to do odkrycia zasady wywoływania implozji pod wpływem jonizacji. W 1944 r. J. von Neumann zaproponował zastąpić bor mieszaniną (DT), licząc na to, że podczas wybuchu jądrowego, wskutek podgrzewu i kompresji pod wpływem jonizacji, w mieszaninie (DT) zajdzie reakcja syntezy i dzięki emisji neutronów gęstość rozszczepień się zwiększy. Jego koncepcja stała się ważnym krokiem na drodze stworzenia bomby jądrowej z termojądrowym wzmacniaczem. Wiosną 1946 r. K. Fuchs, zastanawiając się nad usprawnieniem inicjacji wybuchu, wpadł na pomysł przeniesienia mieszaniny (DT) z izotopu ^{235}U do podgrzewanego promieniowaniem berylowego reflektora. Ponadto, w celu utrzymania promieniowania w obrębie reflektora postanowił otoczyć go nieprzenikalną dla promieniowania obudową. Ponieważ kompresja mieszaniny (DT) odbywa się pod wpływem promieniowania z rozszczepialnego ładunku jądrowego w kierunku strefy, w której się spala termojądrowy materiał, przeto ma ona charakter implozji radiacyjnej. Stała się prototypem przyszłej metody Tellera–Ulama otrzymywania wysokich kompresji.

Warunki zapłonu paliwa termojądrowego w busterze mogą być osiągnięte znacznie wcześniej przed momentem zakończenia reakcji łańcuchowej. Zatem, wygenerowana liczba neutronów z reakcji syntezy wzmacnia reakcję łańcuchową, a w konsekwencji – zwiększa energię wybuchu.

Pod koniec reakcji łańcuchowej dominującym czynnikiem wzrostu temperatury jest promieniowanie hamowania i rozpraszanie komptonowskie. W tej fazie, temperaturę opisuje równanie:

$$kT \approx 18[\text{keV}] \quad (19)$$

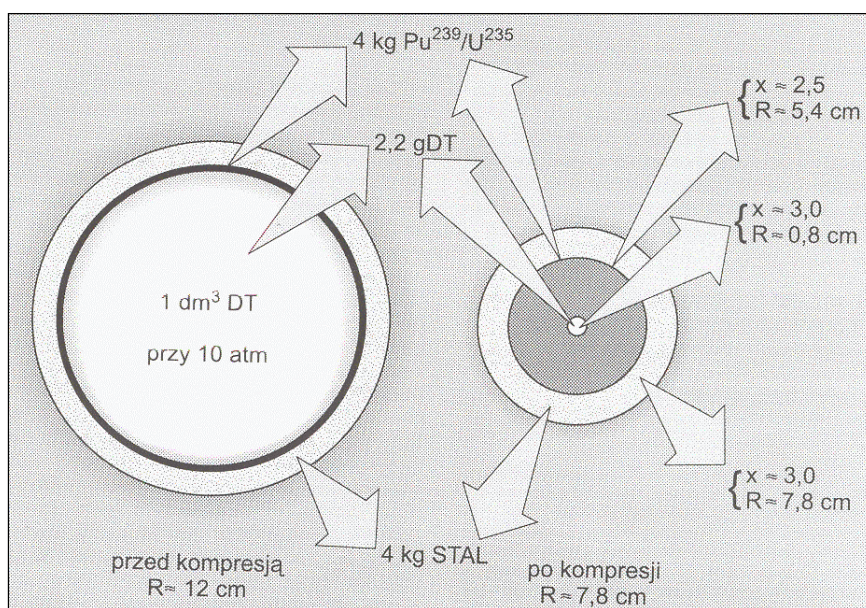
gdzie: k – stała Boltzmanna, η – wydajność, χ – współczynnik kompresji

Wynika z niego, że maksymalna temperatura bomby rozszczepieniowej jest bardzo słabo zależna od kompresji i wydajności. Jej wartość zawiera się w granicach 5–10 keV, które bardzo trudno przekroczyć. Natomiast do otrzymania plazmy na osnowie reakcji (DT), (D^3He) i (DD), bez zewnętrznego nagrzewania, krytyczne wartości wynoszą odpowiednio: 4,2, 18 i 25 keV. Widać więc, iż o ile maksymalna temperatura bomby rozszczepieniowej jest dostateczna do zainicjowania reakcji (DT), to jednak w przypadku reakcji (D^3He) i (DD) może być niewystarczająca. Dla (DT), (D^3He) i (DD) krytyczne wartości temperatury, niezbędne do zapoczątkowania reakcji syntezy za pomocą zewnętrznego nagrzewania promieniami X, są następujące: 2,4, 9,0, i 10 keV. Z tego wynika, że zapoczątkowanie reakcji (D^3He) lub (DD) za pomocą promieniowania X z materiału rozszczepialnego, jest możliwe wyłącznie w ograniczonym zakresie temperatury, w chwili gdy reakcja łańcuchowa jest bliska wygaśnięcia. Reakcja (DT) zaś może się rozpocząć przy niższej temperaturze, gdy wydajność reakcji rozszczepienia (uwarunkowana gęstością neutronów z reakcji syntezy) jest

jeszcze względnie niska, co silnie wpływa na końcowy efekt reakcji łańcuchowej. Dlatego reakcja (DT) jest jedyną, która się nadaje do zastosowania w busterze, a tryt – bezwzględnie koniecznym składnikiem nowoczesnej broni jądrowej, opartej na reakcji rozszczepienia.

Stosowanie busteru umożliwia uniknąć konstruowania grubego, masywnego reflektora, a zarazem pozwala budować bomby o małej masie i znacznych wydajnościach. Ponadto ze względu na fizyczne cechy plazmy warunki inicjowania reakcji syntezy są mało czułe na zmianę współczynnika kompresji, ilość trytu i tło neutronowe. W rezultacie, bomby z rozszczepieniowym busterem są bardziej niezawodne, wydajniejsze i bezpieczniejsze (w obsłudze) niż bomby go pozbawione. Te ostatnie, produkowane są przez kraje nieatomowe, nieprzestrzegające zakazu o nierozprzestrzenianiu.

Schemat busteru pokazano na rys. 7. Rdzeń w postaci skorupy z plutonu i/lub wzbogaconego uranu jest otoczony stalowym płaszczem (i w miarę możliwości berylowym reflektorem) oraz „soczewkami” skupiającymi energię wybuchu materiału chemicznego. Na krótko przed detonacją do zasobnika wprowadza się gazową mieszaninę (DT) o ciśnieniu kilkudziesięciu atmosfer. Mieszanina (lub tylko tryt) jest przechowywana w oddzielnym pojemniku poza zasobnikiem. Przyspiesza to wykonywanie ewentualnych napraw i zapewnia, że wzmacniacz w przypadku awaryjnego wybuchu materiału chemicznego nie zostanie uruchomiony. Dane liczbowe podane na rysunku są typowe. Według najbardziej autorytatywnego, odtajnionego źródła w nagromadzonych zapasach broni jądrowej na jedną głowicę przypada – 4 g trytu. Do wywołania implozji takiego urządzenia potrzeba ok. 10 kg chemicznego materiału wybuchowego. Podczas wybuchu uranowy rdzeń i płaszcz implodują w tym samym momencie co gaz (DT); rdzeń zostaje wtłoczony do pustej wnęki,



Rys. 7. Schemat busteru: zasobnik zawierający 2,2 g paliwa przed i po kompresji wywołanej wybuchem 10 kg chemicznego materiału

a poddany kompresji (DT) przybiera kształt kulisty o promieniu kilku milimetrów. Gęstość uranu wzrasta 2,5 razy, gęstość (DT) zaś osiąga ok. 7 g/cm^3 , czyli 30 razy większą od początkowej. Skonstruowanie urządzenia ze wzmacniaczem nie jest zadaniem prostym, szczególnie jeśli się dąży do osiągnięcia energii wybuchu, równoważnej kilku kilogramom trotylu. Podstawowa trudność polega na tym, że we wnęce wypełnionej mieszaniną (DT) trzeba umieścić rozruchowe źródło neutronów. Ponadto, ponieważ mieszanina (DT) i pluton nie osiągają maksymalnej kompresji w tej samej chwili, to czas trwania impulsu neutronów z owego źródła musi być bardzo precyzyjnie określony. Buster może być także przydatny do produkcji broni jądrowej, w której zamiast jądrowo czystego plutonu zastosowano pluton reaktorowy⁸. Niezależnie jednak od rodzaju materiału rozszczepialnego skonstruowanie prostej bomby z busterem może być łatwiejsze niż prymitywnych bomb zrzuconych na Hiroszimę i Nagasaki.

⁸ Zmagazynowany w USA tzw. pluton jądrowo czysty składa się z 94% ²³⁹Pu i ok. 6% ²⁴⁰Pu.

Głównym problemem jest zaopatrzenie się w kilka gramów trytu. Jest wielce prawdopodobne, iż w pięciu urządzeniach wybuchowych, przetestowanych przez Indie w maju 1998 r. jądrowo czysty pluton nie był zastosowany.

W konkluzji trzeba podkreślić, iż z punktu widzenia broni opartej na materiale rozszczepialnym, do najważniejszych technicznych i strategicznych cech bustera należą:

- wzmacnianie eksplozji, będące najważniejszą charakterystyką broni jądrowej drugiej generacji, a jedynym stosowanym w tym celu efektywnym paliwem termojądrowym jest mieszanina (DT),
- możliwość budowania rozszczepieniowych urządzeń wybuchowych o względnie wysokiej wydajności i zwartej konstrukcji.

5. BROŃ ZMINIATURYZOWANA

Bomby i pociski miniaturowe należą do nowej klasy broni jądrowej. Dla jej rozwoju konieczne jest przeprowadzanie testów, co może doprowadzić do naruszenia międzynarodowego traktatu o zakazie doświadczeń (moratorium obowiązuje od 1992 r.), a dla państw nieatomowych stać się pretekstem do wypowiedzenia traktatu o nierozpowszechnianiu. To ostatnie porozumienie jest w istocie oparte na zasadzie przetargu: państwa nieatomowe godzą się na nierozwijanie broni jądrowej pod warunkiem, że państwa ją posiadające będą dążyły do rozbrojenia. Niestety, ta zasada w praktyce nie była przestrzegana.

Niepokój przeciwników budzi nie tylko broń artyleryjska, ręczna lub walizkowa, lecz przede wszystkim bomby zdolne do znacznego przenikania w głąb ziemi, tzw. penetracyjne. Dzięki satelitarnemu systemowi naprowadzania będą zdolne do niszczenia podziemnych przechowalników głowic nuklearnych (silosów wyrzutni rakiet balistycznych), broni chemicznej i biologicznej, co już zaczyna budzić obawy o wznowienie wyścigu zbrojeń.

5.1. Bomby małogabarytowe

Dążenie do zminiaturyzowania jądrowych urządzeń wybuchowych ma długą historię. Już bowiem w 1960 r. Stany Zjednoczone zbudowały swoją pierwszą minibombę o wydajności 1 kt. Jej waga wynosiła ok. 45 kg, a wymiary umożliwiały przenoszenie w torbie. Przeznaczona była do używania w akcjach sabotażowych wymierzonych w lotniska, mosty i tamy. Jednocześnie rozwijano broń artyleryjską. Pojawiły się działa małego kalibru (rys. 8).

Działo to miało zasięg ok. 2 km. Uzbrojony pocisk o długości 76 cm i średnicy 28 cm (w maks. przekroju) ważył 34,5 kg, w tym głowica jądrowa (typu W54) zaledwie 23 kg. Stanowiła najmniejszą i najlżejszą broń jądrową typu implozyjnego (patrz makieta na rys. 9). Używana była przez armię USA z wydajnością (stopniowaną co 0,01 kt) w granicach 0,02 – 1 kt. W ramach programu „Special Atomic Demolition Munition” (SADM), USA wyprodukowały setki mini – ładunków typu plecakowego.



Rys. 8. Żołnierze 101 Powietrzno Desantowej Dywizji USA przy dziale bezodrzutowym „David Crockett” kalibru 120 mm podczas ćwiczeń w 1962 r. (za uprzejmym pozwoleniem „The Brookings Institution, U. S. National Archives”)



Rys. 9. Projektanci przy makiecie pocisku artyleryjskiego W48, kalibru 155 mm
(za uprzejmym pozwoleniem U.S. Department of Energy i U.S. Nuclear Weapons Cost Study Project, The Brookings Institution)

W 1997 r. opinia publiczna została poruszona wiadomością o rosyjskiej tzw. bombie walizkowej, opracowanej dla KGB⁹. Posiadała moc 1 kt, co wystarczałoby do zrujnowania wszystkiego w promieniu ok. 700 m. Ujawnił to gen. Aleksander Lebed¹⁰ podczas spotkania z amerykańskimi kongresmanami 30 maja 1997 r. Pełnił wówczas funkcję sekretarza Rady Bezpieczeństwa Rosji. Podczas zarządzonej przezeń kontroli liczebności broni jądrowej okazało się, że wojsko zgubiło trop w poszukiwaniu zaginionych 84 walizkowych bomb. Rząd rosyjski zdementował te informacje, a ówczesny premier Czernomyrdin rekomendował „spać spokojnie”, na co generał odrzekł, że „można się nawet nie obudzić”. Do czasu jego zwolnienia z funkcji (17 października 1996 r.), udało się doliczyć 48 zaginionych „walizeczek”. Według słów generała, podczas prac kontrolnej komisji specjaliści uczestniczący w konstrukcji i przechowaniu tej amunicji mieli „tendencję do tajemniczego znikania”. Fakt posiadania przez Rosję takiej broni potwierdził także Aleksiej Jabłokow¹¹, uczony o międzynarodowym uznaniu, który miał kontakty z jej konstruktorami i obsługą. Był zszokowany faktem istnienia operatywnej broni jądrowej, której czas i miejsce wybuchu określa nie prezydent, ale młodszy oficer. W wywiadzie dla dziennika „Trud” (07.09. 1999) powiedział, że w ZSRR już w latach sześćdziesiątych skonstruowane zostały przynajmniej dwa typy min jądrowych, przeznaczone do działań na terytorium wroga. Jedno z takich urządzeń (wspomniane wyżej) o wadze 40 kg posiadało gabaryty: 60x40x20 cm. Dla jego przygotowania do wybuchu, jednemu człowiekowi wystarczyło 20 min. W późniejszym czasie owe miny zastąpione zostały bardziej zwartymi: 45x35x30 cm, o wadze 30 kg (wliczając w to materiał wybuchowy, elektronikę, źródło neutronów itp. rzeczy) i mocy 0,2 kt. Nadawały się do przenoszenia w torbie, podobnej do przeznaczonej na zakupy.

Na pytanie, co można zrobić dla zmniejszenia niebezpieczeństwa jądrowego terroryzmu – uczony odpowiedział: „Według mnie, właśnie ze względu na terrorystyczne zagrożenie taką mini - jądrową bronią prezydent Francji w swoim czasie zakazał jej rozwijania i produkcji, Stany Zjednoczone zaś w procesie rozbrajania, jako jedno z pierwszych państw zlikwidowały swe atomowe miny i naboje. Pierwsze, co należy zrobić, to zlikwidować wszystkie istniejące urządzenia jądrowe, podatne do

⁹ KGB: Komitet Gosudarstwiennoj Bezopasnosti.

¹⁰ Gen. A. Lebed w wieku 52 lat zginął w katastrofie helikoptera 28 kwietnia 2002 r.

¹¹ Aleksiej Władimirowicz Jabłokow jest członkiem Rosyjskiej Akademii Nauk i honorowym członkiem American Academy of Arts and Science, wiceprzewodniczącym Światowego Związku Ochrony Przyrody, Ekologii i Radiobiologii. Był deputowanym do Rady Najwyższej ZSRR, członkiem parlamentarnej komisji ds. skutków awarii w Czarnobylu. Piastował stanowisko doradcy prezydenta B.N. Jelcyna ds. ekologii i zdrowia, kierował pracami komisji ds. bezpieczeństwa ekologicznego w Radzie Bezpieczeństwa Rosji. Opublikował ponad 400 prac naukowych i publicystycznych.

wykorzystania w celach terrorystycznych, i pozbyć się dokumentacji technicznej, na której są oparte...”.

Możliwość skonstruowania miniaturowej broni jądrowej wynika z przesłanek natury fizycznej.

Masa krytyczna plutonu ^{239}Pu (odmiany alotropowej alfa) bez reflektora, w kształcie kuli, wynosi 10,5 kg, a jej średnica – 10,1 cm. Do wywołania wybuchu o energii 10–20 t potrzebny jest dziesięcioprocentowy nadmiar masy. Dla zobrazowania, jakie niebezpieczeństwo taka bomba stanowi, podamy, iż na przykład eksplozja ładunku o energii 20 t wytwarza w odległości 300 m promieniowanie o stuprocentowych skutkach letalnych. Ładunek materiału rozszczepialnego w ilości 1,2 masy krytycznej ma wydajność 100 t, a powiększony do 1,35 masy krytycznej – 250 t. Państwo mające zaawansowaną technologię budowy broni jest w stanie poprzez zastosowanie wzmacniacza termojądrowego (bustera) doprowadzić wydajność do zakresu kiloton bez konieczności zwiększania materiału rozszczepialnego. Masę materiału można zredukować za pomocą jej obudowania reflektorem berylowym, aczkolwiek zabieg taki przyczynia się do zwiększenia ogólnych rozmiarów ładunku. Kilkucentymetrowa warstwa berylu zmniejsza plutonowy ładunek o 40–60%. Ponieważ gęstość właściwa berylu jest dziesięciokrotnie mniejsza od gęstości właściwej plutonu, więc tą drogą można by było zaoszczędzić nawet sporą ilość materiału rozszczepialnego. Oczywiście nadmierne, ponad- optymalne pogrubienie reflektora będzie prowadzić do wzrostu ciężaru, gdyż objętość kuli wzrasta proporcjonalnie do trzeciej potęgi promienia. Jeśli więc masa krytyczna plutonu równa się 10,5 kg, to uwzględniając współczynnik 1,3 otrzymamy, że do wywołania znacznej eksplozji potrzeba ok. 13 kg. Do tego należy dodać masę reflektora i „opakowania”, co w sumie daje ok. 15 kg. Wartość ta koresponduje z najmniejszą – jaką kiedykolwiek wyprodukowano w USA – masą elipsoidalnego pocisku o wadze 23 kg. Jego energia, w zależności od wersji, wahała się od 10 t do 1 kt, wymiary zaś wynosiły: długość osi małej – 27,3 cm, dużej – 40 cm. Natomiast urządzenie doświadczalne o wymiarach 28 cm na 30 cm, będące prototypem owego pocisku, miało ciężar zaledwie 16 kg, czyli uderzająco zbieżny z wyżej oszacowanym.

Nie jest to wszakże kres miniaturyzacji broni jądrowej. Prowadzone są studia nad skonstruowaniem naboju armatniego o średnicy 105 mm. Pociski armatnie o zwartej, kulistej konstrukcji są budowane na zasadzie tzw. liniowej implozji. Polega ona na tym, że osadzone w cylindrze podkrytyczne masy o małej gęstości poddaje się kompresji poprzez wytworzenie dwustronnej eksplozji. Ciśnienie, wywołane uderzeniowymi falami, doprowadza masy do kulistego układu w stanie nadkrytycznym. Bardziej wyrafinowaną odmianą techniki liniowej implozji będzie zarysowująca się koncepcja cylindrycznej implozji. W tym przypadku masa plutonu w kształcie sferoidalnym poddawana jest ciśnieniu (wytworzonemu przez wysoko wybuchowy materiał) jednocześnie na całym obwodzie. W wyniku kompresji materiał rozszczepialny przybiera kształt dysku. Za pomocą tego typu konstrukcji będzie można stworzyć najbardziej spłaszczoną bombę zapewne o grubości zaledwie 5 cm. Jest rzeczą oczywistą, iż takie rozwiązanie otwierałoby drogę do wyprodukowania bomby portatywnej.

5.2. Broń ręczna

Pojawienie się broni ręcznej kalibru ok. 30 mm stworzyło możliwości wykorzystania w niej naboju atomowych z kalifornu. Ich wydajność jest znacznie większa od ładunków konwencjonalnych. W zależności od kalibru energia wybuchu takiego naboju waha się w szerokich granicach: od 0,5 t do 5 t.

Sztucznie otrzymany po raz pierwszy w 1950 r. pierwiastek kaliforn posiada ponad siedmiokrotnie większy przekrój czynny na rozszczepienie, niż uran – 235. Dzięki temu jego masa krytyczna jest niezwykle mała przy odpowiedniej gęstości może wynosić nawet 10 g. Umożliwia to skonstruowanie naboju o masie (brutto) mniejszej niż 1 kg i promieniu rażenia nie mniejszym niż 1 km. Transport naboju odbywa się w specjalnym kontenerze z urządzeniem do cyrkulacyjnego chłodzenia¹² za pomocą gazu (borowodór – B_2H_6), kompresorem oraz osłoną przed promieniowaniem. Przed oddaniem strzału kulę uwalnia się z zacisków doprowadzających gaz, ładuje się do zamka, a następnie bezwładnościowe zabezpieczenia uruchamiają pirotechniczny (lub piezoelektryczny) detonator. Ogień prowadzi się z ukrycia, chroniącego strzelca przed falą uderzeniową, promieniowaniem świetlnym i jonizującym.

¹² ₉₈²⁵¹Cf wskutek samorzutnego rozpadu ($T_{1/2} = 898$ a) generuje ok. 30–40 W/g.

Broń tego rodzaju jest przeznaczona w zasadzie do działań dywersyjnych. Jej masową produkcję ogranicza niezwykle wysoki koszt produkcji kaliforniu-251 (ok. 100 USD za 1/10 mikrograma).

5.3. Pociski penetracyjne

Jądrowe pociski tego rodzaju mają małą moc. Rozwijane są w państwach atomowych z myślą o ich użyciu w działaniach wojennych, prowadzonych za pomocą broni konwencjonalnej przeciw państwom trzeciego świata, gdyby zastosowanie broni jądrowej o większej mocy nie było współmierne do broni przeciwnika, a przez to i nie wskazane. Traktat o Powszechnym Zakazie Prób z Bronią Jądrową, przyjęty przez Zgromadzenie Ogólne ONZ 10 września 1996 r.¹³, zabrania rozwijania badań nad skonstruowaniem precyzyjnej broni jądrowej o mocy mniejszej niż 5 kt, ponieważ „nisko wydajna broń zaciemnia granicę oddzielającą wojnę atomową od konwencjonalnej”. Jednakże pomimo tego USA starają się podjąć prace studialne nad bronią jądrową zdolną w sposób bezwybuchowy przeniknąć w głąb ziemi, a osiągnąwszy cel – zniszczyć go tam. Dowodzą tego zalecenia Podkomisji ds. Bezpieczeństwa Narodowego i Spraw Zagranicznych Izby Reprezentantów Kongresu z lutego 2003 r. Dokument zwraca uwagę na fakt, iż „, takie podziemne urządzenia, jak umocnione bunkry i tunele w twardej skale, stanowią skuteczne ukrycie do ataku”. W tych miejscach bowiem, potencjalny przeciwnik może gromadzić broń konwencjonalną, chemiczną, biologiczną i nuklearną, a także budować stanowiska dowodzenia i kierowania.

Działanie pocisków polega na takim likwidowaniu położonych pod kilkusetmetrową warstwą granitu obiektów, by nie narazić przy tym na niebezpieczeństwo okolicznej ludności. Zwolennicy tej broni argumentują, że dzięki niej uniknie się zniszczeń pobocznych, co pozwoli na jej zastosowanie jak broni konwencjonalnej. Jednakże żaden pocisk tego typu (nawet o mocy 1% bomby zrzuconej na Hiroszimę) nie jest w stanie przeniknąć na taką głębokość, by jego wybuch nie wywołał skutków naziemnych. Eksplozja bowiem wytwarza krater, z którego unoszony radioaktywny pył będzie opadać na otaczający teren.

Posiadane przez Stany Zjednoczone konwencjonalne pociski penetracyjne są zdolne do zniszczenia umocnionych obiektów na głębokości ok. 15 m; zastosowane zostały w wojnie o Kuwejt. Ośmiocalowy pocisk z laserowym systemem naprowadzającym, zburzył wówczas w Iraku żelazobetonowy bunkier na głębokości ok. 9 m.

W ostatniej dekadzie pociski penetracyjne poddano istotnemu ulepszeniu zarówno pod względem dokładności rażenia, skuteczności zagłębiania się, jak i siły wybuchu. Sądzi się, iż są one obecnie w stanie unieruchomić instalacje silosów wyrzutni rakiet balistycznych, uważanych dotąd za nieodporne jedynie na wybuch jądrowych bomb dużej mocy.

W 1997 r. w Stanach Zjednoczonych opracowano jądrową mini-bombę (B61-11) ze wzmocnionym kadłubem i stożkowym czołem, z utwardzonej stali. Było to wbrew oficjalnej polityki państwa – nierozwijania nowych rodzajów broni jądrowej. Skuteczność przenikania w podziemie owego pocisku była dość ograniczona. Testy wykazały, że bomba zrzucona z wysokości ok. 12 km zagłębiała się zaledwie na 6 m. Uważa się, iż jej użycie w obszarze zabudowanym będzie prowadzić do masowych ofiar wśród ludności. Nawet po osiągnięciu krańcowej głębokości wybuch o energii w zakresie 0,3–300 kt wytworzyłby ogromnych rozmiarów, skażony radioaktywnymi substancjami krater i śmiertelne natężenie promieniowania gamma.

Powstaje problem: jaką głębokość musi osiągnąć pocisk, by zarówno wybuch, jak i promieniotwórcze skażenie nie wywołały skutków na powierzchni ziemi. Amerykańskie doświadczenia z pociskami jądrowymi stosowanymi w wykopaliskach pokazały, że wybuch jądrowy w małych zagłębieniach oprócz natychmiastowych skutków w postaci promieniowania ciepłego i fali uderzeniowej powoduje także wyjątkowo intensywne, miejscowe opady radioaktywne. Przy tym, ognista kula rozrywa górną warstwę gruntu, wyrzucając do atmosfery ogromne ilości kurzu i fragmentów rumowiska. Ponieważ substancje te uległy intensywnemu napromienianiu neutronami, będą powiększać ilość materiału promieniotwórczego pochodzącego bezpośrednio z reakcji rozszczepienia.

Typowa chmura wywołana eksplozją posiada rozłożystą podstawę z wznoszącą się nad nią zwężoną kolumną, wypełnioną radioaktywnym pyłem. Z obliczeń na podstawie przybliżonego, empirycznego wzoru:

¹³ 24 września 1996 r. podpisało go 71 państw, w tym także „atomowe”.

$$P_p = 1219 \cdot W^{1/3} \quad (20)$$

gdzie: P_p – promień chmury u podstawy, w metrach,
 W – energia wybuchu, w kilotonach (kt)

wynika, że dla $W = 5$ kt, promień wynosi ok. 2 km, a dla $W = 100$ kt – ok. 6 km.

Na podstawie licznych testów wykonanych na poligonie w Stanie Newada wyprowadzono wzór na głębokość niezbędną do całkowitego wyeliminowania skutków wybuchu na powierzchni terenu:

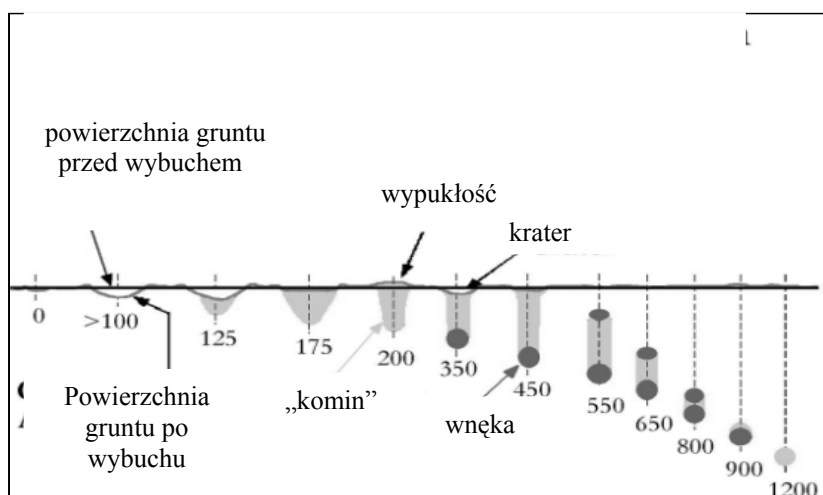
$$D \geq 137 \cdot W^{1/3,4} \quad (21)$$

gdzie: D – głębokość, w metrach,
 W – energia wybuchu, w kt.

Stąd dla: $W = 5$ kt, $D \approx 200$ m, a dla $W = 100$ kt, $D \approx 500$ m.

Wszakże zostało udokumentowane, iż także przy tych parametrach starannie zasklepione szyby ulegały rozerwaniu, uwalniając do otoczenia promieniotwórcze skażenia. Z tego można wyciągnąć wniosek, że pociski zdolne do spenetrowania podziemia na głębokości setek metrów i wywołania tam eksplozji spowodują zapewne skażenia okolicznego rejonu promieniotwórczymi pyłami i gazami. Płytkie wybuchy tworzą ogromne kratery. Na rys. 10 pokazano ewolucję rozwoju krateru w wyniku wybuchu ładunku o mocy 1 kt w funkcji głębokości. Z przeprowadzonych badań wynika, że nawet w przypadku ładunku o dziesięciokrotnie zredukowanej mocy efekty jego wybuchu zostaną zatrzymane dopiero na głębokości ok. 70 m.

Maksymalna głębokość penetracji jest silnie ograniczona, jeśli w czasie ruchu pocisku jego kadłub ma być zachowany w stanie nienaruszonym. W zasadzie jednak owa głębokość jest zależna od wytrzymałości konstrukcyjnej kadłuba. Wszakże również w przypadku materiałów o wysokiej wytrzymałości prędkość w momencie uderzenia większa od kilku kilometrów na sekundę może doprowadzić do znacznej deformacji,



Rys. 10. Formowanie się krateru w zależności od (wyrażonej w metrach) głębokości umiejscowienia jądrowego ładunku o mocy 1 kt (za uprzejmym pozwoleniem Terriego Wallece'a)

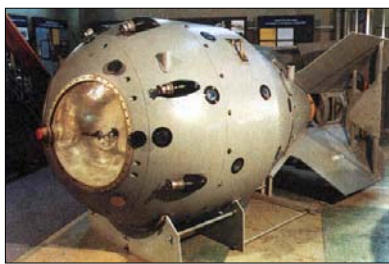
a nawet stopienia kadłuba. Pociski jądrowe penetrujące grunt muszą być tak wykonane, by podczas ruchu zabezpieczały zarówno materiał wybuchowy, jak i elektroniczne urządzenia, co w przypadku zastosowania bardzo twardej stali prowadzi do ograniczenia prędkości do ok. trzech kilometrów na sekundę.

W zakończeniu rozważań nad zastosowaniem mało wydajnej broni jądrowej nowej generacji należy podkreślić ogromne niebezpieczeństwo, jakie niesie za sobą przejście od wojny konwencjonalnej do atomowej. Dowodzi tego wojna koreańska, podczas której Stany Zjednoczone powstrzymały się przed użyciem broni jądrowej nawet w obliczu przewagi sił wroga.

6. KONSTRUKCJA BOMBY WODOROWEJ

W odróżnieniu od historii rozwoju broni atomowej droga powstawania broni termojądrowej odznaczała się do pewnego stopnia żywiołowością. Pod koniec 1945 r. przyszłość „Projektu Manhattan” – przedsięwzięcia ogromnych rozmiarów, w którym w fazie końcowej pracowało ok. 5000 naukowców – po osiągnięciu głównego celu, jakim było skonstruowanie bomby atomowej, nie była klarowna. W owym czasie o broni termojądrowej myślał głównie Edward Teller, spiritus movens działania na rzecz jej skonstruowania. Już we wrześniu 1941 r. w jego dyskusji z Fermim zrodziła się myśl o możliwości inicjowania reakcji termojądrowych w ośrodku zawierającym deuter, za pośrednictwem wybuchu atomowego. Rok później w Berkeley plejada wybitnych uczonych ze Stanów Zjednoczonych i Europy podczas dyskusji nad programem prac Laboratorium w Los Alamos dotknęła także problemu superbomby z deuterem. To właśnie tu E. Teller po raz pierwszy zarysował projekt „klasycznej superbomby”. Wówczas sądzono, iż bomba rozszczepieniowa mogłaby być użyta skutecznie do zainicjowania zapłonu ciekłego deuteru w cylindrze z jednego jego krańca i że w rezultacie reakcja termojądrowa rozwine się samoistnie, osiągając drugi jego kraniec. W opublikowanym pod koniec sierpnia raporcie Teller zaproponował nowy, alternatywny – w odniesieniu do „klasycznej superbomby” – schemat działania bomby termojądrowej o nazwie „budzik”. Urządzenie zawierało kolejno ułożone kulistego kształtu warstwy materiału rozszczepialnego i termojądrowego (deuter, tryt lub ich chemiczne związki). Układ posiadał szereg potencjalnych zalet. Neutrony powstałe z reakcji syntezy w warstwach paliwa termojądrowego powinny były wywoływać rozszczepienia w sąsiednich warstwach materiału rozszczepialnego i w konsekwencji prowadzić do znacznego zwiększenia wydzielanej energii. W rezultacie kompresji paliwa termojądrowego, wywołanej jonizacyjną implozją, miał nastąpić silny wzrost jego gęstości i gwałtowny rozwój termojądrowych reakcji. Jednakże atomowy inicjator wymagał wielkiej mocy, tym bardziej iż z „budzikiem” wiązały się nadzieje na stworzenie bomby megatonowej lub nawet wielomegatonowej. Ogromny ciężar i wielkie rozmiary konstrukcji znacznie utrudniały lub praktycznie uniemożliwiały otoczenie bomby chemicznym materiałem wybuchowym. We wrześniu 1947 r. E. Teller zaproponował wykorzystać w „budziku” nowe termojądrowe paliwo: deuterok litu. Powodem była trudność przechowywania deuteru pod dużym ciśnieniem lub w postaci ciekłej w bardzo niskiej temperaturze. Tworząc związek chemiczny deuteru z litem, mający stabilną, stałą postać, tych problemów można było uniknąć. Zastosowanie izotopu litu – ${}^6\text{Li}$ wiązało się z nadzieją wyprodukowania podczas eksplozji – poprzez reakcję (9) – wielkiej ilości trytu, co miało się przyczynić do zintensyfikowania spalania termojądrowego paliwa.

Jednakże w owym czasie prace nad projektem „budzika” z powodu piętrzących się trudności z inicjacją uległy przyhamowaniu. 23 września 1949 r. prezydent Harry Truman oznajmił: „...Mamy dowody, iż w ciągu ostatnich tygodni w Związku Sowieckim miał miejsce atomowy wybuch”¹⁴. A 31 stycznia 1950 r. oświadczył: „Jako Naczelnny Dowódca Sił Zbrojnych jestem po części odpowiedzialny za sprawowanie nad nimi nadzoru, by nasz kraj był zdolny się obronić przed jakimkolwiek możliwym agresorem. Zgodnie z tym wydałem polecenie Komisji ds. Energii Atomowej kontynuowania prac nad wszystkimi rodzajami broni atomowej włącznie z tzw. bombą wodorową lub Super”. Obok sowieckiego atomowego testu inną przyczyną tej deklaracji prezydenta było wykrycie – na kilka dni przed jej ogłoszeniem – szpiegowskiej działalności Klausa Fuchsa na rzecz Sowietów. To on właśnie w walnie przyczynił się do powstania sowieckiej bomby atomowej.



Rys. 11. Pierwsza sowiecka bomba atomowa, znana pod kryptonimem RDS – 1 (masa – 4700 kg, średnica – 1500 mm, długość 3300 mm)

¹⁴ Za przekazanie tajemnicy broni atomowej Związkowi Sowieckiemu oskarżone zostało małżeństwo Ethel i Juliusz Rosenbergowie. 28 marca 1951 r. sąd przysięgłych uznał ich winę; straceni zostali na krześle elektrycznym w więzieniu Sing Sing.

Wybuchu pierwszej swej bomby atomowej (rys.11) Związek Sowiecki dokonał na poligonie Semipałatyńskim 29 sierpnia 1949 r. Jako materiału rozszczepialnego użyto plutonu. „...Nasza pierwsza bomba atomowa była kopią amerykańskiej” – oświadczył 11 sierpnia 1992 r. w wywiadzie dla gazety „Krasnaja Zwiezda”, kierownik naukowy Rosyjskiego Federalnego Centrum Jądrowego – akademik Julij Chariton¹⁵, bardzo już sędziwy. A w „Izwestijach”, opublikowanych 8 grudnia 1992 r. niejako wyjaśniał: „... Był to najszybszy i pewny sposób, by pokazać, że my również posiadamy broń jądrową...”.

Decyzja prezydenta nadała pracom badawczym tempa. Przeciw rozwojowi dalszych prac nad bombą wodorową ostro protestował Robert Oppenheimer, wówczas przewodniczący Generalnego Konsultatywnego Komitetu Komisji ds. Energii Atomowej. W liście do Dawida E. Lilienthala, przewodniczącego Komisji ds. Energii Atomowej (dokument nr 349, z 30 października 1949 r.) pisał: „...Po rozwiązaniu problemów z inicjacją, ograniczenie mocy wybuchu bomby przestaje istnieć z wyjątkiem narzuconego wymaganiami transportowymi. ...Skutki eksplozji tej broni będą setki razy większe od obecnych bomb rozszczepieniowych. Wywoła ona zniszczenia na obszarach rzędu setek mil kwadratowych... Jest rzeczą jasną, że jej zastosowanie doprowadzi do śmierci niezliczonej liczby ludzkich istnień...”. Protestowali również inni członkowie owego Komitetu, m.in. E. Fermi i I.I. Rabi. Pisali: „...Oczywiście, że użycie takiej broni nie może być usprawiedliwione na jakiegokolwiek podstawie etycznej, która istocie ludzkiej nadaje osobowość i godność, nawet wówczas gdyby się okazało, że pochodzi z wrogiego kraju. Taka broń z konieczności wychodzi znacznie poza cele militarne i dotyka skali bardzo wielkich, naturalnych katastrof. Ze względu na jej naturę, nie można jej ograniczyć wyłącznie do celów wojskowych, gdyż praktycznie staje się ona prawie narzędziem ludobójstwa...”. Wszakże Sztab Generalny, Departamenty Stanu i Obrony oraz Komitet ds. Energii Atomowej (KEA) wypowiedziały się za kontynuacją badań. Wkrótce pod kryptonimem „George” przeprowadzone zostały doświadczenia z „klasyczną superbombą”. Urządzenie doświadczenia otrzymało nazwę – „Cylinder”. Konstrukcja inicjatora eksplozji opierała się na opatentowanym przez K. Fuchsa i Johna von Neumanna rozwiązaniu. Ważnym osiągnięciem tego eksperymentu stało się zainicjowanie – pod wpływem wybuchu bomby rozszczepieniowej (atomowej) – reakcji termojądrowej w małej objętości deuteru i trytu. Idea implozji radiacyjnej zademonstrowała swą ogromną przydatność. Jednakże obliczenia przeprowadzone przez Stanisława Ulama i Korneliusa J. Everetta pokazały, że ilość trytu potrzebnego do zapalenia ciekłego deuteru w „klasycznej superbombie” będzie przeogromna, a propagacja i samopodtrzymywanie się reakcji nie są możliwe. Autorzy stwierdzili, iż zaproponowana konstrukcja nie nadaje się do zastosowania. Potwierdziły to także wyniki obliczeń przeprowadzonych przez J. von Neumanna na pierwszym, wielkim, elektronicznym komputerze do ogólnych zastosowań – ENIAC. Jednak wniosek o nieprzydatności „klasycznej superbomby”, chociaż wywołał napięcia między Ulamem a Tellerem, dalszych badań nie

¹⁵ Julij Borysowicz Chariton (1904–1996) był synem znanego petersburskiego, liberalnego dziennikarza i aktorki dramatycznej, grającej na scenie moskiewskiego teatru. Ich stosunki rodzinne nie układały się zbyt szczęśliwie, żyli w separacji. Matka wkrótce wyjechała do Niemiec na leczenie, gdzie znalazła drugiego męża i nigdy już nie wróciła. Ojca po rewolucji wybrali w Leningradzie dyrektorem Domu Dziennikarza. Jako liberał nie przypadł do gustu bolszewikom, więc udał się do Rygi, gdzie wydawał gazetę. Jednakże w 1940 r. wpadł w ręce władzy sowieckiej, która go za ów liberalizm wsadziła do Gułagu. W latach czterdziestych i pięćdziesiątych Julij Chariton często spotykał się z L. Bериą, ówczesnym szefem KGB, któremu podlegały wszystkie obozy, ale o ojca się nie upominał. Mówił później, że mogło się to niekorzystnie odbić na jego pracy.

W domu rodzinnym estońska guwernantka uczyła go języka niemieckiego. Mając piętnaście lat otrzymał maturę, ale do Instytutu Technologii mógł wstąpić dopiero po ukończeniu szesnastego roku. Odbył staż naukowy w Cambridge u Rutherforda. Zajmował się procesami dynamiki wybuchów. W 1943 r. związał się z Igorem Kurczatowem. Wraz z Jakowem Zeldowiczem przeprowadzał obliczenia masy krytycznej uranu – 235. Później znalazł się w ośrodku badań jądrowych „Arzamas-16”, znajdującym się pod kuratelą L. Berii, który nie ukrywał, iż w razie niepowodzenia atomowego projektu, wszystkich fizyków posadzą lub rozstrzelają. Miał już nawet przygotowane nazwiska „dublerów”. Przed doświadczalnym wybuchem pierwszej bomby, Kurczatowa i Charitona wezwał Stalin. Interesowało go, czy nie dałoby się zamiast jednej bomby, zbudować dwóch, niechby nawet słabszych. Stalin zakazał Kurczatowowi latać samolotami, używał więc pociągów. Chariton również przywykł do podróżowania tym środkiem lokomocji. Gdy był już szefem Arzamaza-16, zbudowali mu komfortową salonkę z sypialnią, gabinetem, przedziałem dla gości i kuchnią. Należał przecież do elitarnego grona najbardziej honorowanych twórców atomowej potęgi sowieckiego państwa.

inicjator detonacji (człon pierwszy), z drugiej zaś – otoczony masywnym „płaszczem” z materiału o dużej gęstości (uran lub wanad, w kształcie kuli, cylindra, lub elipsy) – człon drugi z paliwem termojądrowym. W środku tego członu usytuowany jest zapalnik z materiału rozszczepialnego (^{239}Pu lub ^{235}U): kula o średnicy od 2 do 3 cm z wydrążoną centralną częścią. Od paliwa termojądrowego jest on oddzielony (nie pokazaną na rys.) grubą osłoną z uranu lub wanadu. Przestrzeń między członami wypełnia polistyren (styropian). Po eksplozji członu pierwszego, kapsuła z paliwem termojądrowym poddana zostaje napromienianiu (pochodzącymi z reakcji rozszczepienia) promieniami X. Zawarte w polistyrenie węgiel i wodór ulegają jonizacji; tworzy się gorąca plazma. Dzięki bardzo szybkiemu ustalaniu się równowagi termicznej, rozkłady temperatury, gęstości energii i ciśnienia w plazmie się wyrównują. Ich oddziaływanie na człon drugi jest równomierne ze wszystkich stron. Plazma reemituje długofalowe promieniowanie X, które jest pochłaniane w „płaszczu”. Wewnętrzna i zewnętrzna powierzchnie kapsuły nagrzewają się do bardzo wysokiej temperatury. Warstwa osłonowa między zapalnikiem a paliwem termojądrowym oraz „płaszcz” zapobiegają przedwczesnemu wysokiemu podgrzaniu się paliwa termojądrowego. Wskutek rozgrzewania się powierzchni „płaszcz” następuje jego rozszerzanie się i termiczna ablacja (odrywanie się warstw powierzchniowych).

Zachodzący proces wtłaczania odpadającego materiału „płaszcz” powoduje ogromny wzrost ciśnienia i przyspieszenie implozji. Środowisko zjonizowanego węgla oraz wodoru opóźnia ekspansję „płaszcz” i zapobiega zablokowaniu zjonizowanej przestrzeni przez jego (nieprzenikliwy dla promieni X) materiał, zanim osiągnięte zostaną warunki równowagi termicznej.

Za kompresję i szybkie wtłaczanie do wewnątrz paliwa termojądrowego odpowiedzialne jest wyłącznie ciśnienie materiału uwalnianego wskutek ablacji. Pozostałe dwa potencjalne źródła ciśnienia wywieranego przez plazmę i termiczne oddziaływanie promieni X bezpośredniego wpływu na proces nie mają. Natomiast ciśnienie wytworzone przez plazmę przyczynia się do implozji kapsuły z paliwem termojądrowym, „płaszczem” i rozszczepialnym zapalnikiem. W wyniku kompresji jej średnica się zmniejsza prawie dziesięciokrotnie, co prowadzi do ponadtysięckrotnego wzrostu gęstości tego paliwa. W tym momencie siła wybuchu zapalnika jest wykorzystywana jedynie do kompresji kilku kilogramów paliwa. Jednakże paliwo rozszczepialne takiego stopnia kompresji nie osiąga. Oddziałująca nań fala uderzeniowa podnosi jego temperaturę do wysokiej wartości, a kompresję – do umiarkowanej, zwiększając gęstość ok. czterokrotnie. Jednakże jest to wystarczające do powstania stanu nadkrytycznego. Gwałtownie narastająca szybkość rozszczepień w plutonie, łącznie z oddziaływaniem – wywołanej przez falę uderzeniową – wysokiej temperatury, przyczynia się do wzrostu temperatury paliwa termojądrowego, dostatecznej do zainicjowania reakcji syntezy. Samopodtrzymujące się spalanie paliwa termojądrowego rozprzestrzenia się na całą objętość, a masywny „płaszcz” powstrzymuje ucieczkę promieniowania cieplnego. W miarę wzrostu temperatury rośnie szybkość reakcji syntezy, a co za tym idzie – również efektywność spalania. Temperatura może przekraczać 300 milionów K. i jest znacznie większa od wartości, którą zdolna jest wytworzyć reakcja rozszczepienia.

Paliwo jądrowe w postaci deuterku litu zazwyczaj jest wzbogacone w izotop – ^6Li . Naturalnego litu używano we wcześniejszych konstrukcjach, ale współczesna broń, o mniejszej masie zawiera lit wzbogacony.

W wyniku oddziaływania neutronów z rozszczepienia powstaje pewna ilość trytu, jednakże jej wpływ na wydajność bomby jest nieistotny. O wiele więcej trytu – dzięki neutronom z reakcji (8) – pochodzi bezpośrednio z reakcji (7) lub (9). Ponieważ wydajność reakcji (DT) jest duża, a deuteru jest nadmiar, więc zużywanie trytu odbywa się z tą samą prędkością, co jego produkcja. Duża ilość trytu powstaje także w wyniku oddziaływania neutronów o energii 14,1 MeV na izotop ^7Li (12). Znaczna ilość paliwa termojądrowego może ulec spalaniu, zanim ekspansja materiałów (wskutek zmniejszenia się gęstości) zdławi reakcję, co trwa od 20 do 40 nanosekund. Uciekające z paliwa termojądrowego neutrony o energiach: 2,45 MeV i 14,1 MeV – poprzez rozszczepienia w znajdującym się w „płaszczu” uranie – 238, wnoszą znaczny udział do energii wybuchu.

Wprawdzie „konfiguracja Tellera–Ulama” dotyczy bomby dwuczłonowej, to jednak opisana zasada może być z powodzeniem rozszerzona na układ trzyczłonowy. Potrzeba takiej konstrukcji wynika z ograniczonego stopnia kompresji, którą można osiągnąć, w dostatecznie krótkim czasie, za pomocą inicjatora detonacji. Przy budowie dużych bomb eksplozję członu drugiego wykorzystuje się

do kompresji i detonacji członu trzeciego, którego wydajność może być od 10 do 100 razy większa od członu poprzedniego. Wzmiankowana wyżej bomba o energii 58 Mt miała konstrukcję trójczłonową.

Wiele lat później Hans Bethe napisze: „Dla mnie, aktywnego uczestnika programu (budowy bomby wodorowej; J. K.), nowa koncepcja była tak samo zaskakująca, jak dla fizyków w 1939 r. odkrycie rozszczepienia (jądra atomu)... W historii nauki takie cuda przypadkowo się zdarzają, ale byłoby głupotą liczyć na ich pojawienie się”.

4 kwietnia 1951 r. E. Teller w opublikowanym raporcie (LAMAS – 1230) opisał nowy schemat działania superbomby. Istota usprawnienia polegała na umieszczeniu zapalnika z materiału rozszczepialnego w drugim członie, w środku termojądrowego paliwa. Szło o wywołanie wewnątrz – poddanej kompresji tego paliwa – inicjującego, atomowego wybuchu. W ten sposób pierwszy człon stracił niejako znaczenie zapalnika, stał się w głównej mierze katalizatorem stwarzającym warunki do zapłonu paliwa. Prace nad nową superbombą nabrały tempa. Test urządzenia o nazwie „Mike” z powodzeniem przeprowadzony został 1 listopada 1952 r. Ciekły deuter był przechowywany w naczyniu Dewara, otoczonym warstwą naturalnego uranu, o wadze ponad 5 t. Stalowa obudowa urządzenia o grubości 25–30 cm, miała ponad 2 m szerokości i ok. 6 m długości. W owym czasie była to największa pojedynczo wykonana odkuwka. W historii rozwoju broni jądrowej wydarzenie zapisało się jako wybitne osiągnięcie w realizacji amerykańskiego, termojądrowego programu. Energia wybuchu wynosiła 10,4 Mt; powstał krater o średnicy ok. 1900 m i głębokości 50 m. Urządzenie eksperymentalne o wadze 82 t zbudowane zostało na stanowisku naziemnym. Aparatura kriogeniczna, jaką skonstruowano dla utrzymania deuteru w stanie ciekłym, była najbardziej skomplikowaną na świecie. Ironia całego przedsięwzięcia polegała na tym, iż do otrzymania najwyższej temperatury kiedykolwiek wytworzonej na Ziemi deuter trzeba było schłodzić do temperatury bliskiej absolutnego zera, tzn. do najniższej na naszej planecie. Przed Stanami Zjednoczonymi stanął problem stworzenia mobilnej broni termojądrowej. Departament Obrony zajął się pilną analizą możliwości transportu. Najbardziej nadającym się samolotem w owym czasie był bombowiec ConVAir B – 36. Postanowiono, by parametry bomby zostały ograniczone do następujących: średnica – 159 cm, waga – 25 t. W maju 1953 r. bomba była przygotowana do przeprowadzenia testu. Konstrukcja spełniała narzucone ograniczenia: średnica wynosiła – 156 cm, długość – 756 cm, a waga – 18 144 kg. W ostatnim momencie stwierdzono jakieś problemy z członem pierwszym; ponownie skontrolowano ilość potrzebnego litu. Na posiedzeniu Generalnego Komitetu Doradców Komisji ds. Energii Atomowej Hans Bethe zwrócił uwagę, iż lit – 6 jest przydatny głównie do bomb dużych, i do wszystkich urządzeń termojądrowych, ponieważ może być źródłem trytu in situ. Natomiast lit – 7 do tych celów się nie nadaje, gdyż z niego tryt się nie tworzy. Można by było z niego otrzymać tryt na drodze reakcji z neutronami o energiach 3–4 MeV. Sądzone przy tym, że przekroje czynne na reakcje z neutronami w przedziale 3–17 MeV nie są dostatecznie duże, by za ich pośrednictwem udało się otrzymywać znaczące ilości trytu. W połowie 1953 r. uporano się z techniką zrzutu bomby. Określono, iż załoga samolotu będzie potrzebowała co najmniej 200 s, by się oddalić na bezpieczną odległość. Ogromne trudności wiązały się z technologią ciekłego deuteru. Równoległe do doświadczeń, pod kryptonimem „Castle” przygotowywano także serię trzech bomb z paliwem termojądrowym w postaci stałej (deuterek litu). Pierwsza typu „Alarm Clock” (budzik) zawierała 95% Li – 6, w drugiej o nazwie „Shrimp” wzbogacenie w Li – 6 wynosiło 40%, w trzeciej zaś (nazwanej „Runt”) zastosowano lit naturalny: 6,5% Li – 6 i 93,5% Li – 7. Przy czym nad tą ostatnią zastanawiano się, czy (ze względu na niepewność powstawania trytu z Li – 7) w ogóle poddawać ją doświadczeniu.

Najpierw 1 marca 1954 r. dokonano eksperymentu pod nazwą „Castle – Bravo” z wybuchem naziemnym mobilnej bomby „Shrimp”. Wynik był zaskakujący: energia wynosiła 15 Mt, tj. 2,5 razy więcej od spodziewanej. Wydajność „budzika” równała się 6,9 Mt, a energie dwukrotnego wybuchu bomby „Runt”, o największej zawartości Li – 7, były równe: 11 Mt i 13,5 Mt. Ponadto wyniki pokazały, iż nawet zwyczajny wodorek litu (nie wzbogacony w Li – 6) może być paliwem termojądrowym. Jakże dalekie od prawdy okazały się przewidywania dotyczące przekroju czynnego Li – 7. W ten sposób przypadek zrzucił, iż odpadła konieczność uruchomienia bardzo drogich zakładów separacji Li – 6. I sprawa chyba najważniejsza: bomby z kriogeniczną aparaturą nie były więcej potrzebne, zastąpione zostały bronią z paliwem termojądrowym w postaci stałej, z równie wysoką wydajnością, ale o znacznie mniejszych wymiarach i ciężarze, co rozwiązało problem ich transportu.

Po upływie prawie dwóch lat, 21 maja 1956 r. przeprowadzony został pierwszy amerykański wybuch bomby termojądrowej, zrzuconej z samolotu.

6.2. Historia powstawania bomby termojądrowej w Związku Sowieckim

Program rozwoju broni termojądrowej w USA znajdował się pod baczna obserwacją Związku Sowieckiego. Do I.W. Kurczatowa¹⁶ informacje wywiadowcze na temat amerykańskiej broni jądrowej napływały od 1945 r. We wrześniu owego roku uzyskano konkretny materiał zawierający fragmenty teorii działania „klasycznej superbomby”, łącznie ze schematem jej konstrukcji. Najważniejsza wiadomość dotyczyła wartości przekroju czynnego na reakcję (DT). Tą drogą uczeni sowieccy otrzymali – na trzy i pół roku przed ich ukazaniem się w jawnych publikacjach – dane o unikatowych właściwościach trytu. Szczególnie ważnym okazały się materiały dotyczące superbomby atomowej o zwiększonej energii wybuchu, zastosowaniu techniki implozji oraz dwuczłonowej konstrukcji. Spośród nadchodzących wiadomości o pracach w USA nad „superbombą”, szczególną uwagę zwracał materiał, w którym pod „superbombą” kryła się nie bomba termojądrowa, lecz bomba atomowa o zwiększonej mocy. Mówiło się w nim również o tym, iż w bombie tego rodzaju, pierwszy wybuch wywoływał implozję i w konsekwencji wybuch drugiego ładunku – kuli z plutonu ²³⁹Pu. Rozwiązanie takie sprzyjało większej wydajności energii. Szło więc o dwuczłonową konstrukcję bomby atomowej. Niepokoiło to wielce władze sowieckie. 24 października 1945 r. problem superbomby został włączony do spisu pytań, z którymi – zgodnie z poleceniem L.P. Berii – niejaki J.P. Terlecki miał się w Danii zwrócić do Nielsa Bora. Na temat „superbomby” wielki uczyony odpowiedział dość enigmatycznie: „Co znaczy superbomba? Jest to bomba o większym ciężarze od już wynalezionej lub bomba wykonana z jakiegoś nowego materiału. Cóż, pierwsze jest możliwe, ale bezmyślne, gdyż, jak powtarzam: siła niszcząca bomby i tak jest ogromna, a drugie – myślę, że jest nierealne”. Odpowiedź wszakże władz sowieckich nie zadowoliła. W tej sytuacji I.W. Kurczatow polecił Ju. B. Charitonowi, by razem z I.I. Gurewiczem, J.B. Zeldowiczem i I.J. Pomeranczukiem rozważyli zagadnienie możliwości wyzwolenia energii z pierwiastków lekkich. Raport na ten temat został przez nich przedstawiony 17 grudnia 1945 na posiedzeniu Rady Technicznej, na którym podjęto jedynie decyzje o konieczności przeprowadzenia pomiarów przekrojów czynnych na reakcje z lekkimi jądrami. Natomiast w odniesieniu do badań nad superbombą, żadnych zaleceń nie sformułowano. Tym niemniej grupa teoretyków z Instytutu Chemii Fizycznej Akademii Nauk pod kierownictwem J.B. Zeldowicza, w ramach programu badań nad problemami spalania i wybuchu termojądrowego, rozpoczęła teoretyczne dociekania możliwości uwolnienia energii z lekkich jąder. W tym samym czasie do Związku Sowieckiego nadchodziły wywiadowcze informacje na temat amerykańskich prac nad superbombą. W fachowych czasopismach pojawiły się także publikacje E. Tellera. 28 września 1947 r. w Londynie odbyło się spotkanie K. Fuchsa z przedstawicielem sowieckiego wywiadu A.S. Feklisowem. Ze sporządzonego z tego spotkania sprawozdania wiadomo, że K. Fuchs przekazał ustną informację o prowadzonych w Chicago, pod kierunkiem E. Tellera i E. Fermiego teoretycznych pracach nad superbombą. K. Fuchs opisał także niektóre jej konstrukcyjne szczegóły oraz zasady funkcjonowania, a ponadto zwrócił uwagę na zastosowanie – obok deuteru – również trytu. Poinformował także, że E. Teller i E. Fermi, na początku 1946 r. udowodnili możliwość efektywnego działania superbomby. Jednakże A.S. Feklisow, nie będąc fizykiem, zdołał jedynie w sposób przybliżony odtworzyć jej konstrukcyjne szczegóły. Prawie miesiąc później wywiad sowiecki uzyskał informacje o amerykańskich próbach wywołania reakcji w środowisku deuteru, trytu i litu. Zawierały one również wiadomość o zamiarze E. Tellera jej użycia w bombie termojądrowej, której konstrukcja wiązała się z jego nazwiskiem. W owym czasie było to pierwsze doniesienie wywiadowcze, w którym mówiło się o licie jako składniku termojądrowego paliwa.

13 marca miało miejsce zdarzenie, które odegrało wyjątkową rolę w dalszym rozwoju prac nad bronią termojądrową w Związku Sowieckim oraz w sposób zasadniczy wpłynęło na ich organizację i postęp. W owym dniu bowiem odbyło się w Londynie drugie spotkanie K. Fuchsa¹⁷

¹⁶ Od 1943 r. kierownik naukowy programu prac nad reakcją łańcuchową później – Laboratorium nr 2 i Instytutu Energii Atomowej. 8 stycznia 2003 r. minęło stulecie jego urodzin.

¹⁷ Klaus Fuchs (1911–1988) – fizyk niemiecki. Wychowany w rodzinie pastora; podczas studiów wstąpił do Komunistycznej Partii Niemiec. Uciekając przed reżimem Hitlera, znalazł się w Anglii. Na uniwersytecie w Bristolu uzyskał doktorat. W maju 1940 r., gdy Anglii groził hitlerowski najazd, jako Niemiec został internowany. Z Anglii wysłano go do Kanady, gdzie w ciężkich warunkach przebywał w obozie w Quebecu. Dzięki staraniom jego kolegów-naukowców, a także A. Einsteina, w grudniu 1940 r. został zwolniony i wrócił do Anglii. W 1943 r., wraz z kilkoma innymi uczonymi władze brytyjskie oddelegowały go do pracy w USA. Pracował w „Columbia University”, a następnie w laboratorium w Los Alamos, gdzie pod kierownictwem Hansa Bethego zajmował się teoretycznymi zagadnieniami. Nie było zapewne lepszego miejsca, z którego można by było przesyłać informacje do Związku Sowieckiego. W Santa Fe przekazał sowieckiemu

z A.S. Feklisowem. Przekazane materiały miały pierwszorzędą wagę, zawierały konkretne teoretyczne dane dotyczące superbomby i opis projektu „klasycznej superbomby” z nowym (w stosunku do projektu z 1945 r.) systemem inicjacji zapłonu. Opis przedstawiał dwuczłonową konstrukcję, opartą na zasadzie radiacyjnej implozji, wykresy obrazujące działanie inicjującego zestawu oraz eksperymentalne i teoretyczne dane, uzasadniające zdatność projektu do pracy, w tym również doświadczalne wartości przekrojów czynnych na reakcje: (DT) i (D^3He). W zasadzie materiał dotyczył patentu K. Fuchsa i J. von Neumanna z 1946 r.¹⁸. Kierownictwo Ministerstwa Bezpieczeństwa Publicznego uważało otrzymaną informację za na tyle ważną, iż przetłumaczywszy przesłało ją do wiadomości Stalinowi, Mołotowowi i Berii, którzy uznali ją jako dowód istotnego postępu w budowie broni jądrowej w USA. Podjęto więc decyzję o forsownych pracach. W rządowych uchwałach, obok dyrektywy tej wagi, co dotyczącej „zorganizowania prac badawczych na temat teorii spalania deuteru” – wydanej Instytutowi Fizyki Akademii Nauk – znajdowały się również polecenia polepszenia warunków mieszkaniowych szeregu pracowników naukowych, w szczególności zaś – przydzielenie pokoju A.D. Sacharowowi, współpracownikowi grupy I.J. Tamma. W czerwcu 1948 r. specjalna grupa naukowców Instytutu Fizyki, w składzie: I.J. Tamm, S.Z. Bełen’kij i A.S. Sacharow, rozpoczęła prace nad zagadnieniem reakcji jądrowej w deuterze. A jednocześnie inna grupa, z Instytutu Chemii Fizycznej, pod kierunkiem J.B. Zeldowicza zajmowała się problemem detonacji

kurierowi dokładne, zwymiarowane rysunki bomby „Fat Man”. W kwietniu 1946 r. uczestniczył w ściśle tajnej, trzydniowej konferencji w Los Alamos, na której dokonano przeglądu prac nad superbombą. Po powrocie do Anglii w 1946 r. pracował w atomowych zakładach w Harwell. Jego szpiegowska działalność dobiegła końca w grudniu 1949 r. Rozprawa sądowa trwała niespełna dwie godziny. Otrzymał wyrok 14 lat więzienia; po dziewięciu – został zwolniony. Udał się natychmiast do Niemieckiej Republiki Demokratycznej, gdzie w ośrodku atomowym pod Dreznem wznowił pracę naukową; został wicedyrektorem Instytutu Fizyki Jądrowej i członkiem Akademii Nauk NRD.

¹⁸ Wg oficjalnego określenia (w odtajnionych dokumentach USA) najważniejsza zasada działania broni termojądrowej jest następująca: „W broni termojądrowej promieniowanie pochodzące z broni rozszczepieniowej może być utrzymywane i wykorzystane w celu przekazania energii dla wywołania kompresji i zainicjowania – fizycznie oddzielnego – zestawu z paliwem termojądrowym”. Określenie to w równym stopniu odnosi się do schematu K. Fuchsa, jak i do konfiguracji Tellera–Ulama. Jednakże w schemacie K. Fuchsa i konfiguracji Tellera–Ulama wykorzystuje się zasadniczo różne modyfikacje idei implozji radiacyjnej. U K. Fuchsa utrzymywane za pomocą obudowy promieniowania wykorzystuje się do jonizacyjnej kompresji – podgrzanego promieniowaniem – termojądrowego zestawu w postaci ciekłej mieszaniny (DT). Natomiast w konfiguracji Tellera–Ulama jest ono wykorzystywane w celu wywołania fali udarowej, która przyczynia się do kompresji niepodgrzanego promieniowaniem zestawu termojądrowego o bardziej złożonej konstrukcji.

deuteru. Zadaniem pierwszej była kontrola i uściślenie wyników obliczeń zespołu Zeldowicza. Sacharow w czasie tych prac, zastanawiając się nad alternatywnym rozwiązaniem, rozważał skonstruowanie bomby z materiału w postaci mieszaniny deuteru i uranu ^{238}U , czyli układ analogiczny do „budzika”.¹⁹ Niezależnie od Tellera odkrył wówczas ideę układu heterogenicznego, którą nazwano: „słojka”²⁰, a opartą na niej zasadę jonizacyjnej kompresji – „sacharyzacja”.

Warto w tym miejscu podkreślić, iż w sukces Związkowi Sowieckiemu, w jego gorączkowych wysiłkach dogonienia Stanów Zjednoczonych, przysłyły nie tylko wywiadowcze informacje, lecz również szczęśliwy zbieg okoliczności: pojawienie się wybitnych naukowych indywidualności. Wystarczy dla przykładu przywołać takie postaci, jak J.B. Zeldowicz (1914–1987), który w wieku siedemnastu lat (bez uniwersyteckiego dyplomu) brał udział w pracach naukowych leningradzkiego Instytutu Chemii Fizycznej Akademii Nauk czy A.D. Sacharow, którego w 1947 r. przed ukończeniem studiów doktoranckich zapraszano do udziału w programie atomowym; w wieku trzydziestu dwóch lat został najmłodszym członkiem Akademii Nauk.

Początkowe trudności ze „słojką” polegały na tym, iż do analizy zajścia reakcji (DT) brakowało danych o przekroju czynnym. Dopiero informacje otrzymane kanałami wywiadowczymi umożliwiły W.L. Ginsburgowi zorientować się, że przekroje czynne na reakcje (DT) są kilkadziesiąt razy większe od przekroju czynnego na reakcję (DD). W raporcie z 23 sierpnia, 1949 r. pt. „Fala detonacyjna w układzie D^6Li ” przedstawił obliczenia wskazujące dobitnie, iż stosowanie deuterku litu – 6 w „słojce” jest bardziej perspektywiczne, niż użycie czystego deuteru lub ciężkiej wody.

Zaledwie cztery dni od ogłoszenia dyrektyw prezydenta Trumana w ZSRR Komitet Specjalny podjął decyzję na temat prac nad konstrukcją bomby wodorowej, oznaczonej symbolem RDS – 6. Rozpoczęte zostały prace teoretyczne, doświadczalne i konstrukcyjne dotyczące dwóch rodzajów kryjących się pod kryptonimowym określeniem: „izdelije” (wyrób, produkt) bomb wodorowych: RDS – 6s („słojka”) i RDS – 6t („truba” – rura).

Pewną kontrowersję wśród kierownictwa programu atomowego, na pewien czas wzbudziło zagadnienie budowy bomby rozszczepieniowej wielkiej mocy, oznaczonej indeksem: RDS – 7. Jednakże bomba ta testu się nie doczekała. Po niedługich rozważaniach pierwszeństwo przyznano broni termojądrowej, jako mającej nieograniczoną siłę wybuchu. Decyzja ta utorowała drogę koncepcji Sacharowa („słojka”), o zakresie energii rzędu kiloton.

W czasie, gdy prace nad RDS – 6s z powodzeniem rozwijały się, Stany Zjednoczone 1 listopada 1952 r. przeprowadziły test urządzenia termojądrowego wielkiej mocy – „Mike”. O wywołanym z tego powodu zaniepokojeniu sowieckiego kierownictwa świadczy list Berii z 2 listopada 1952 r. do kierownictwa PGU²¹, w którym się mówiło: „...Zagadnienie budowy RDS – 6s posiada pierwszorzędne znaczenie. Sądząc według niektórych otrzymanych przez nas danych, USA przeprowadziły doświadczenie związane z produktem tego typu.... Powinniśmy podjąć wszystkie wysiłki dla zakończenia naukowo-badawczych i doświadczalnych prac dotyczących RDS – 6s”.

Doświadczenie z modelem RDS – 6s zostało przeprowadzone 12 sierpnia 1953 r. Energia wybuchu wynosiła 400 kt. Był to czwarty z kolei test z serii jądrowych doświadczeń, rozpoczętych w Związku Sowieckim 29 sierpnia 1949 r.²² Stał się przełomowym wydarzeniem w historii tworzenia bomby wodorowej w Związku Sowieckim i najważniejszym etapem w rozwoju broni jądrowej w tym państwie. Ważną okoliczność stanowił fakt, że ładunek RDS – 6s wykonany został w postaci bomby mobilnej, przystosowany do środków przenoszenia. Był więc pierwszym egzemplarzem broni termojądrowej, przystosowanej konstrukcyjnie do produkcji seryjnej. Jednakże dalsze wysiłki zbudowania bomby o wielkiej mocy na podstawie RDS – 6s (za pomocą kompresji paliwa termojądrowego i uranu, wywołanej wybuchem środka chemicznego) okazały się beznadziejne. Rozpoczęto więc rozwijanie konstrukcji dwuczłonowej, do czego zmuszała także decyzja o zaprzestaniu prac nad nienadającym się do realizacji urządzeniem RDS – 6t. 14 stycznia 1954 r. Zeldowicz i Sacharow, w notatce skierowanej do Charitona²³, zaproponowali schemat bomby dwuczłonowej. Składały się nań, umieszczone w masywnej obudowie: bomba atomowa w członie

¹⁹ Istota takiego układu polega na wykorzystaniu – będącego produktem reakcji (DD) – neutronu do rozszczepienia plutonu ^{239}Pu lub uranu ^{235}U .

²⁰ W tłumaczeniu na polski: „przekładaniec”.

²¹ PGU – „Pierwsze Głównie Uprawienie” (Pierwszy Zarząd Główny przy Radzie Ministrów, później przekształcony w Ministerstwo Przemysłu Średniego, któremu podlegał przemysł atomowy).

²² Wybuch pierwszej bomby atomowej.

²³ Ju.B. Chariton – był wówczas kierownikiem Laboratorium nr 2 Akademii Nauk, zajmującym się konstrukcją bomb atomowych, i głównym konstruktorem.

pierwszym i ładunek termojądrowy w członie drugim. Na rysunku nr 13 pokazano pierwszą stronę dokumentu, opisującego ideę „AO” („atomnoje obzatiye” – atomowa kompresja).

Koncepcja była oparta na idei stworzenia kompresji za pomocą ciśnienia gazów z atomowego wybuchu, czyli wykorzystania fali udarowej. Jednakże pomimo prostej konstrukcji jej ewentualne działanie wywoływało wiele wątpliwości. Z pomocą znów przyszły informacje ze Stanów Zjednoczonych, które 1 marca 1954 r. przeprowadziły test największej swej bomby²⁴, co świadczyło, że wkroczyły w nowy etap rozwoju broni termojądrowej. Stało się to także dowodem, iż odkryto tam nową ideę konstrukcji. Miesiąc później mechanizm kompresji drugiego członu za pomocą implozji radiacyjnej stał się także znany naukowcom sowieckim. Przed budowniczymi bomb o nieograniczonej energii wybuchu otworzyły się szerokie perspektywy.

Treść jest następująca:

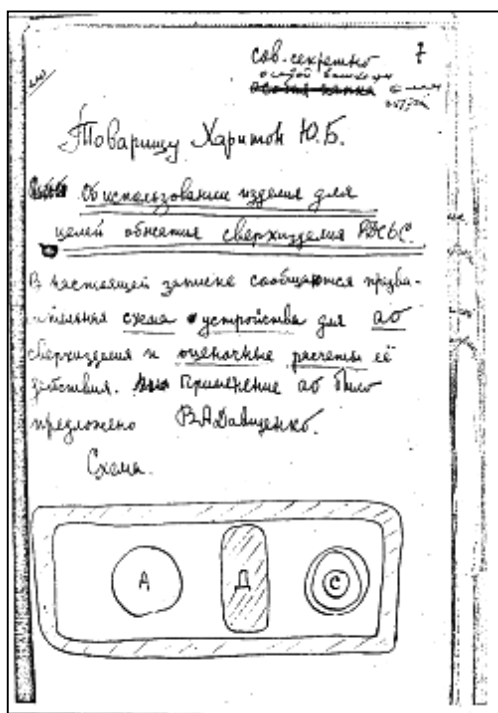
„Ścisłe tajne

Teczka specjalna

Do towarzysza Charitona Ju. B.

Dotyczy zastosowania rury do implozji „superwyrobu” („swierchizdelija”) – RDS – 6s. Raport przedstawia wstępny schemat i obliczenia własności. Zastosowanie AO zaproponował W.A. Dawidenko.

Schemat”



Rys. 13. Notatka
Zeldowicza i Sacharwa do
Charitona

²⁴ Operacja „Castle Bravo” na Atolu Bikini; energia: 15 Mt. Powstał krater o wymiarach śr. ok. 2 km, głęb. 76 m. Po 8 min. chmura osiągnęła pełne wymiary: śr. – 100 km, „pień grzyba” – 7 km, podstawa „grzyba” na wysokości – 16,5 km. Wystąpiły największe skażenia radioaktywne w historii USA.

6.3. Wybuch termojądrowej superbomby

Po tym, kiedy 1 maja 1960 r. nad Swierdłowskiem zestrzelono amerykański wywiadowczy samolot U-2, pilotowany przez Powersa, ówczesny przywódca ZSRR Nikita Chruszczow wpadł w gniew i groził Stanom Zjednoczonym. Nie była to czcza gadanina. W owym czasie bowiem w supertajnym ośrodku atomowym ARZAMAS-16 (obecnie miasto Sarow) dobiegały końca prace nad konstrukcją wodorowej superbomby (rys.14) energii 100 Mt, tzn. o około 7 tys. razy większej od bomby zrzuconej na Hiroszimę. Latem 1961 roku, kiedy prace nad tym monstrem ukończono, powstał problem wyboru miejsca przeprowadzenia wybuchu doświadczalnego. Wybrano poligon na Nowej Ziemi o powierzchni 82 600 km², gdyż ani położony w Kazachstanie Semipałatyński poligon doświadczalny, ani Tocki poligon w obwodzie Orenburskim – okazały się do tego celu nieprzydatne. Jednak po zanalizowaniu obszaru rażenia o promieniu sięgającym 1000 km okazało się, iż w jego zasięgu znalazły się miasta Workuta, Dudinka oraz przemysłowy Norilsk, a port Dikson był w odległości zaledwie 500 km. Postanowiono więc, aby nie ewakuować owych miast, ładunek bomby zmniejszyć o połowę, redukując energię wybuchu do ok. 50 Mt. Natomiast korpus bomby pozostawiono bez zmian. Jego średnica wynosiła około 2,5 m, a długość – około 12 m. W ogonowej części znajdowały się trzy spadochrony, z których główny posiadał powierzchnię 1600 m². 30 października bombę o masie 27 ton z trudem załadowano do strategicznego bombowca Tu-95. Bombowe luki trzeba było zostawić otwarte, gdyż inaczej bomba się nie mieściła. Problem polegał na tym, by bombowiec zdążył opuścić strefę rażenia przed wybuchem, który nastąpił na wysokości 4,5 km, a zrzut – na wysokości ok. 15 km (granicznej dla Tu-95). Samolot z maksymalną szybkością ok. 800 km/h zdążył oddalić się na odległość około 250 km, ale fala udarowa i tak go dosięgła; pilotom wszakże udało się wyjść z opresji. W następstwie wybuchu²⁵ pojawił się nigdy dotąd nie widziany grzyb atomowy. Jego kapelusz o średnicy kilku kilometrów, promieniując czerwono-pomarańczowymi błyskami i szybko się rozrastając przenikał do stratosfery. W muzeum ośrodka ARZAMAS-16 przechowywana jest taśma filmowa z tego wydarzenia, dostępna wyłącznie wąskiemu gronu specjalistów. Lodowiec o grubości 2 m wyparował w promieniu 15–20 km.



Rys. 14. Sowiecka superbomba

Po czołgach, budynkach i urządzeniach technicznych, zgromadzonych dla doświadczeń, w odległości mniejszej od 30 km, nie pozostało śladu. W odległości 270 km od epicentrum grupa uczestników nie tylko zobaczyła przez zaciemnione okulary olśniewający blask wybuchu, lecz także odczuła oddziaływanie świetlnego impulsu. A w oddalonym o czterysta kilometrów, opustoszałym osiedlu zburzeniu uległy drewniane domy, w murowanych zaś uszkodzone zostały dachy, okna i drzwi.

Andriej Sacharow tak opisał nastrój panujący owego dnia w jego otoczeniu. „... Z rana zadzwonił Pawłow (generał KGB, nadzorujący doświadczenie) i przekazał, że samolot już leci nad morzem Barentsa w stronę poligonu. Nikt nie był w stanie pracować. Teoretycy szwędali się po korytarzu, wchodzili do mego gabinetu i wychodzili. O godz. 12 zadzwonił Pawłow i tryumfalnym głosem oznajmił: – „Łączności z samolotem nie ma od ponad godziny. Gratuluję zwycięstwa!”

Sens jego wypowiedzi polega na tym, iż silny wybuch powoduje zakłócenia radiowe, wskutek erupcji wielkiej ilości zjonizowanych cząstek. Po pół godzinie Pawłow poinformował, że chmura radioaktywna wzniosła się na wysokość 60 km (lub 100 km). Teraz, po upływie 26 lat nie pamiętam

²⁵ Był to największy wybuch, jaki dotąd przeprowadzono; moc rzeczywista wynosiła 58 Mt.

dokładnie”. W rzeczywistości wysokość wynosiła 100 km. Wybuch można by było obserwować przez lornetkę z Marsa.

Później, wybitny uczony i myśliciel, wspominając napisze: „...W ciągu dwudziestu lat, od 27 do 47 roku życia – brałem aktywny udział w pracach nad bronią termojądrową. Podejmowaliśmy je w przekonaniu, że są absolutnie niezbędne dla bezpieczeństwa naszego kraju, porwani ogromem stojącego przed nami zadania”.

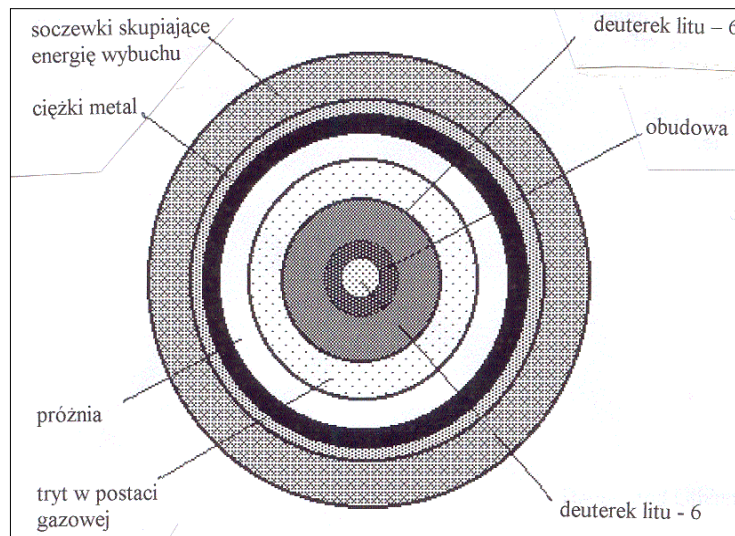
Andriej Sacharow ani słowem nie napomknął w swych pamiętnikach o reakcji Igora Kurczatowa, który będąc głęboko wstrząśnięty tym, co zobaczył – powiedział: „Teraz na tej bombie należy malować gołąbki pokoju. Bomba wodorowa sprawiła, iż wojna staje się rzeczą bezmyślną”. Jego wypowiedź koresponduje ze stanowiskiem tych amerykańskich uczonych, którzy oponowali przeciw jej budowie. Tylko że oni wyrażali swe stanowisko a priori.

7. BOMBA NEUTRONOWA

Ten typ bomby należy do broni jądrowej trzeciej generacji. Uważa się, że jej ojcem jest Sam Cohen. To on bowiem w 1958 r. przekonywał, że gdyby z bomby wodorowej usunąć uranową osłonę, to neutrony mogłyby bez przeszkód, siejąc śmierć, osiągnąć daleki zasięg, penetrując na swej drodze pancerze czołgów lub kilkumetrowe ziemne obwałowania. Przeznaczona jest do działań taktycznych. W zasadzie jest podobna do bomby termojądrowej. W odróżnieniu od niej nie zawiera materiałów rozszczepialnych ani w osłonie, ani w zapalniku. Cała uwolniona energia w postaci intensywnych strumieni neutronów i promieniowania gamma, pochodzi z reakcji syntezy. Wysoko wydajne rozruchowe urządzenie termojądrowe wywołuje na tyle silną falę udarową, iż stopień kompresji ładunku termojądrowego osiąga wartość równą 10.

Ideę konstrukcji bomby pokazano na rys. 15. System sferycznej implozji wytwarza warunki, w których może się rozwinąć reakcja syntezy w małej, centralnie usytuowanej objętości paliwa²⁶. Silne strumienie neutronów stanowią śmiertelne niebezpieczeństwo dla życia. Bomby neutronowe natomiast nie niszczą budowli ani urządzeń wojskowych i co ważne – nie powodują promieniotwórczych skażeń. Pole walki jest natychmiast dostępne do przemarszu wojsk. Dlatego nazywa się je „czystymi”. Są przeznaczone do uśmiercania załóg pojazdów opancerzonych, odpornych na – towarzyszące wybuchowi bomb rozszczepieniowych – promieniowanie cieplne i fale uderzeniowe. Ponieważ stalowy pancerz zmniejsza intensywność promieniowania tylko w nieznacznym stopniu, to taktyczna broń neutronowa w dużym stopniu zwiększa skalę skutków letalnych. Neutrony bowiem oddziałując na stal pancerza, wzbudzają w nim promieniowanie X, na które narażona zostaje załoga.

²⁶ Przykładem powstawania wysokiej temperatury pod wpływem konwergencji sferycznej fali udarowej jest zjawisko sonoluminescencji, czyli emisji światła przez zawarte w cieczy pęcherzyki, pod wpływem oddziaływania na nie fal dźwiękowych. Aczkolwiek samo zjawisko nie jest do końca zbadane, to jednak z doświadczeń wiadomo, że pęcherzyk o średnicy ok. 4 mikronów wzbudzony falą dźwiękową o ciśnieniu 110 dB inicjuje sonoluminescencję. Początkowo małe bąbelki powiększa się o około jedną setną mikrona, a następnie – wskutek implozji – kurczy się do 1 mikrona. W czasie tego procesu temperatura gazu w jego wnętrzu może się zwiększyć do 72000 K, czyli powstaje plazma. Pojawiają się sugestie, że zjawisko może być wykorzystane do kompresji paliwa termojądrowego w celu zainicjowania reakcji syntezy.



Rys. 15. Schemat ideowy bomby neutronowej

Śmierć następuje w ciągu jednego lub kilku dni. Technika wybuchu doprowadzona została do takiej doskonałości, że bomby neutronowe mogą być produkowane o rozmiarach bejsbolowej piłki. Są podatne do użycia przez artylerię i przenoszenia przez małe rakiety. Ich moc jest ograniczona do rzędu kiloton.

Między bombą atomową a neutronową istnieje zasadnicza różnica w podziale energii na poszczególne składowe. Energia wybuchu bomby atomowej dzieli się następująco: 50% – fala podmuchu, 35% – promieniowanie ciepłne, 15% – promieniowanie jądrowe. Natomiast podczas wybuchu bomby neutronowej występują inne proporcje: 30% – fala podmuchu, 20% promieniowanie ciepłne, 50% – promieniowanie jądrowe. Stąd promieniowanie jądrowe wybuchu bomby neutronowej o energii 3 kt jest równoważne promieniowaniu jądrowemu bomby atomowej o energii 10 kt, a udział energii podmuchu i promieniowania ciepłnego odpowiada energii 1 kt takiej bomby. Jest rzeczą oczywistą, iż proporcje między poszczególnymi składnikami energii wybuchu zależą od rozmiaru eksplozji.

USA wstrzymały produkcję tych bomb w 1978 r., a w 1981 r. podjęły na nowo. Rozwój broni neutronowej był odpowiedzią na zagrożenie Europy Zachodniej zmasowanym atakiem czołgowym ze strony Związku Sowieckiego. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że broń tego rodzaju posiadają także Chiny. Analitycy zwracają jednak uwagę, że broń ta jest mniej skuteczna niż standardowa broń atomowa, którą miała zastąpić. Porównanie skutków wybuchu głowic (ładunków) rozszczepieniowych o wydajności 10 kt ze skutkami jednokilotonowej bomby neutronowej wskazuje, że obie obezwładniają załogę czołgu z tej samej odległości: ok. 2,5 km od miejsca wybuchu. Jednakże unieszkodliwienie załogi za pośrednictwem promieniowania neutronowego nie jest zbyt skuteczne, gdyż śmierć następuje z opóźnieniem. Po pochłonięciu bowiem nawet letalnej dawki, obsługa może nie odczuwać osłabienia zdrowia w ciągu jednego dnia, co pozwala jej na kontynuowanie walki. Nawet po otrzymaniu pięciokrotnej letalnej dawki będzie ona zdolna do kilkugodzinnego boju. Skąd więc dowódca polowy – patrząc na niezniszczony czołg – może wiedzieć, czy rzeczywiście go unieszkodliwił?

8. TWÓRCY

Pośród wielotysięcznej rzeszy pracowników naukowych i inżynierów, uczestniczących w amerykańskich programach budowy broni jądrowej, na szczególną uwagę zasługują trzej: Oppenheimer, będący mózgiem „Projektu Manhattan”, Teller – natchniony inspirator konstrukcji bomby termojądrowej i jej współtwórca, oraz Ulam, którego kreatywna siła sprawiła, że prace nad ową konstrukcją zakończyły się sukcesem.

8.1. Robert Oppenheimer



Pochodził z bogatej nowojorskiej rodziny. Z ich apartamentu roztaczał się piękny widok na rzekę Hudson. Wakacje spędzali w letniskowym domu na wyspie Long Island. Mając 17 lat wstąpił na Uniwersytet Harvarda.

Po jego ukończeniu studiował pod kierunkiem Ernesta Rutherforda na uniwersytecie w Cambridge, a później w

Niemczech na uniwersytecie w Getyndze, gdzie w 1925 r. otrzymał doktorat. Po powrocie do USA wykładał min. na Uniwersytecie Kalifornijskim. Pasjonował się mechaniką kwantową. W 1930 r. przyłączył się do ruchu lewicowego. Była to zapewne reakcja na wzrost nastrojów faszystowskich w Niemczech, gdzie jego krewni cierpieli wskutek antysemitycznych ustaw. Ale powodem mogły być także ekonomiczne skutki Wielkiego Kryzysu. Wielu jego studentów bowiem nie mogło znaleźć zatrudnienia. Powiedział wówczas: „Zacząłem rozumieć, jak głęboko, polityczne i ekonomiczne wydarzenia, mogą wpływać na ludzkie życie”. Przyłączył się do różnych lewicowych organizacji, powiązanych z Komunistyczną Partią, przekazując na ich rzecz dary dochodzące nieraz do 1000 dolarów rocznie. W 1941 r. został włączony do prac nad bombą atomową. Zajmował się obliczeniami masy krytycznej uranu – 235. Rok później w Berkeley stworzył grupę najwybitniejszych amerykańskich fizyków-teoretyków w celu wymiany poglądów na temat możliwości skonstruowania bomby atomowej. Wśród owych „luminarzy”, jak ich nazywał, znaleźli się m.in. Hans Bethe i Edward Teller. Wszakże wkrótce uczeni doszli do wniosku, że opracowanie projektu bomby wymaga wielkiego naukowego przedsięwzięcia. Generał Leslie Groves, którego rząd ustanowił pełnomocnikiem ds. programu budowy broni atomowej, mianował Oppenheimera dyrektorem naukowym „Projektu Manhattan”. Podjął tę decyzję pomimo – jak się wyraził – „sęków” w jego politycznym życiorysie. Groves tak go charakteryzował: „On jest genialny, to prawdziwy geniusz...Dlaczego, bo wie o wszystkim. Może rozmawiać o czymkolwiek, co mu się podsunie. No, może niezupełnie. Sądzę, iż jest parę rzeczy, o których nie wie. Nie wie nic o sportach”. Pierwotna, 30-osobowa naukowa grupa szybko się rozrosła do 5000 pracowników, pełnych zapału zbudowania bomby, zanim dokonają tego Niemcy. Gdy dzieło zostało ukończone i 16 czerwca 1945 r. nastąpił dzień próby – Oppenheimer pojął ogrom dokonań. Wybuch urządzenia atomowego o nazwie „Trinity” miał moc 18 kt. Wspominając reakcje obserwatorów eksperymentu, pisał: „Niektórzy się śmieli, inni krzyczeli, większość zaś milczała. W mojej pamięci kołatała się fraza z księgi – „Bhagawadgita”²⁷: Stałem się siewcą śmierci, burzycielem światów”. Nie był to wszakże koniec stojących przed nim wyzwań. Kierując zespołem trzech laureatów Nagród Nobla: Enrico Fermi, Arthur H. Compton i E.O. Lawrence, zmuszony był do udzielenia prezydentowi H. Trumanowi odpowiedzi na prośbę o rekomendację w sprawie użycia pierwszej bomby atomowej przeciw Japonii. Doceniając reperkusje, jakie zastosowanie bomby mogłoby wywołać w stosunkach międzynarodowych, pisał w imieniu uczonych: „Zdajemy sobie sprawę z naszej odpowiedzialności przed narodem za użycie (tej) broni, aby przyczynić się do uratowania życia Amerykanów w wojnie z Japonią.

²⁷ „Pieśń Boga”, hinduski poemat religijny, napisany w sanskrycie w I-II w. n. e.

- (1) ...Rekomendujemy, ażeby przed użyciem broni nie tylko Wielka Brytania, ale także Rosja, Francja i Chiny zostały poinformowane o dokonanych przez nas postępach w pracach nad bronią atomową...
- (2) Opinia naszych kolegów o użyciu tej broni nie jest jednomyślna. Ich poglądy wahają się od propozycji zademonstrowania czysto technicznej strony do militarnego zastosowania w celu wymuszenia kapitulacji. Ci, którzy się wypowiadają za demonstracją czysto technicznej strony, chcieliby wprowadzenia zakazu używania broni atomowej, sądząc, iż gdybyśmy użyli (tej) broni teraz, nasze stanowisko w przyszłych negocjacjach spotkałoby się z niechęcią. Inni kładą nacisk na korzyści, jakie się wiążą z uratowaniem życia Amerykanów w przypadku natychmiastowego użycia; uważają, iż takie użycie przyczyni się do polepszenia międzynarodowych perspektyw, są oni bardziej zaniepokojeni (problemem) zapobieganiem wojnie, niż eliminacją tej specyficznej broni. Jesteśmy bliżsi temu ostatniemu pogładowi; uważamy, iż żadna demonstracja technicznej strony nie jest w stanie przyczynić się do zakończenia wojny; dla bezpośredniego użycia możliwej do przyjęcia alternatywy nie dostrzegamy.
- (3) Odnosnie do ogólnych problemów zastosowania energii atomowej, jest rzeczą jasną, że my ludzie nauki nie mamy prawa wyłączności na głoszenie prawdy...Nie żyjemy pretensji do posiadania kompetencji w rozwiązywaniu socjalnych i wojskowych problemów, które się pojawiają w okresie poprzedzającym nadejście atomowej energetyki”.

Z tekstu widać, w jakiej głębokiej rozterce – w obliczu odpowiedzialności za decyzję o historycznym wymiarze – znajdowali się opracowujący dokument, ile było w nich wahań, zapewne zarówno natury etycznej, jak i politycznej.

W 1946 r., Oppenheimer, przygnieciony rozmiarami tragicznych skutków wybuchów bomb atomowych, w rozmowie z prezydentem Trumanem wyrzucił z siebie: „Panie prezydencie, mam ręce zbroczone krwią”. A w listopadzie 1947 r. wyznał brutalnie, co myśli o swej profesji: „Fizycy poznali grzech i jest to wiedza, od której się nie mogą uwolnić”.

R. Oppenheimer piastował stanowisko przewodniczącego Komisji Energii Atomowej (KEA). 21 grudnia 1953 r. podczas antykomunistycznej akcji w USA został oskarżony o zwlekanie z ujawnieniem sowieckich agentów oraz o sprzeciwianie się rozwojowi prac nad bombą wodorową. Aczkolwiek nie był uznany winnym zdrady, to jednak anulowano jego certyfikat bezpieczeństwa i pozbawiono prawa uczestniczenia w pracach KEA²⁸. Wszakże pozostał dyrektorem prestiżowego instytutu, którego jednym z pracowników był Albert Einstein. Jakże kontrastowała jego sytuacja z tym, co stało się udziałem Andrieja Sacharowa, którego oskarżono na podstawie totalnego kłamstwa i bez wyroku skazano na wygnanie, izolując od społeczeństwa, ponadto zastosowano całodobowy reżim nadzoru służb specjalnych i przymusowe odżywianie...

Pomimo zeznań wielu świadków występujących w jego obronie Oppenheimera nie oczyszczono od zarzutów. Wprawdzie powrócił do pracy naukowej, jednakże postawienie pod pręgierz opinii publicznej złamało jego ducha. W 1963 r. prezydent Lyndon B. Johnson w imieniu Komisji Energii Atomowej uhonorował go nagrodą im. Enrico Fermiego. Cztery lata potem, po przejściu na emeryturę z uniwersytetu w Princeton, w wieku sześćdziesięciu trzech lat zmarł wskutek choroby raka krtani. W historii rozwoju broni jądrowej pozostał „ojcem bomby atomowej”.

8.2. Edward Teller



Urodził się w 1908 r. w Budapeszcie, w zamożnej, mieszczańskiej rodzinie. Kształcił się w Niemczech, gdzie w 1930 r., na Lipskim Uniwersytecie uzyskał doktorat z fizyki. Po objęciu władzy przez Hitlera wyemigrował do Stanów Zjednoczonych. W 1943 r. Robert Oppenheimer zaangażował go w Los Alamos do pracy przy „Projekcie Manhattan”. Walnie przyczynił się do powstania „Lawrence Livermore Laboratory”, będącego w owym czasie głównym zakładem produkcji broni jądrowej, gdzie przez wiele lat piastował stanowisko dyrektora. Za swoją długoletnią działalność na polu naukowym i na rzecz spraw publicznych otrzymał liczne odznaczenia. Opublikował kilkanaście książek na tematy polityki energetycznej i obronności. O ile Robertowi Oppenheimerowi nadano tytuł „ojca bomby atomowej” za zasługi organizatorskie, o tyle Edwarda

²⁸ Na posiedzeniu 29 czerwca 1954 r. pięcioosobowa KEA stosunkiem głosów 4 do 1 postanowiła odmówić dr. Oppenheimerowi dostępu do zastrzeżonych danych.

Tellera nazwano „ojcem bomby wodorowej” za jego odkrywcze idee w jej tworzeniu i polityczne sukcesy, polegające na uzyskaniu aprobaty rządu dla jej wyprodukowania. Wśród amerykańskich fizyków rozpowszechniło się powiedzonko, jakoby autorstwa znawcy sprawy: „Możliwe, iż Teller rzeczywiście jest ojcem bomby wodorowej, ale Ulam zapewne przespał się z jej matką”. Sędziwemu dziś uczonemu dawno wytykano, że się starał pomniejszyć rolę Stanisława Ulama w narodzinach bomby wodorowej. Ten fakt, że stosunki między nimi nie układały się najlepiej, potwierdzają też słowa Hansa Bethego. W 1954 r. na posiedzeniu poświęconemu tzw. „sprawie Oppenheimera” mówił o „bardzo wspaniałym odkryciu” Tellera, o jego „genialnym przebłyску i inspiracji, która dała projektowi solidną podstawę”, nie Tellera i Ulama, lecz właśnie Tellera. Paradoksalnie sam Teller z taką oceną się nie zgadzał. Z perspektywy czasu można przypuszczać, iż wówczas, w latach pięćdziesiątych i Bethe, i Teller nie zdobyli się na bezstronność w kwestii: bronić czy oskarżać Oppenheimera. Pod koniec lat czterdziestych R. Oppenheimer wypowiadał się za zahamowaniem rozwoju broni termojądrowej, sądząc, iż Związek Sowiecki również pójdzie tą drogą. Nie wiedział niestety, iż tam badania nad bronią termojądrową rozwijały się pełną parą. W przeciwieństwie do Oppenheimera, będąc zażartym antykomunistą, odnosił się do państwa sowieckiego z niedowierzaniem; uważał, iż jedynie amerykańska wojskowa potęga jest w stanie powstrzymać jego ekspansję. Dlatego postulował jak najszybsze zbudowanie amerykańskiej broni termojądrowej i odsunięcie Oppenheimera od spraw militarnych. Przeważająca część amerykańskiej społeczności naukowej oceniła wystąpienie Tellera jako jawne pogwałcenie norm etycznych, za co został poddany bojkotowi na całe życie. Cóż takiego powiedział 12 kwietnia 1954 r., że zastosowano wobec niego ostracyzm? Na oficjalnie zadane pytanie: „Czy sugeruje pan, że dr Oppenheimer nie jest lojalny w stosunku do Stanów Zjednoczonych?”, Teller odpowiedział wprost: „Nie chcę niczego takiego sugerować. Znam Oppenheimera jako człowieka intelektualnie nadzwyczaj aktywnego i bardzo złożonego. Sądzę, że byłoby z mej strony zarozumiałością i niestosowne próbować analizować motywy jego postępowania. Jednakże zawsze uważałem i teraz uważam, iż w stosunku do Stanów Zjednoczonych jest on lojalny. Wierzę w to i będę w to wierzyć dopóki nie zobaczę bardzo przekonujących dowodów, iż jest inaczej”. Na następne pytanie: „Czy wierzy pan lub nie wierzy, iż dr Oppenheimer stanowi niebezpieczeństwo?”, Teller odpowiedział: „W wielu przypadkach postrzegałem działania dr. Oppenheimera jako niezmiernie trudne do zrozumienia. W wielu kwestiach różniliśmy się zasadniczo, a jego działania – mówiąc szczerze – wydawały mi się zagmatwane i skomplikowane. W tym ograniczonym sensie chciałbym wyrazić uczucie, iż osobiście czułbym się bardziej bezpiecznym, gdyby sprawy publiczne znajdowały się w innych rękach”. Po tych słowach pozostało niewielu fizyków, którzy się od niego nie odwrócili. Antysowietyzm Tellera był proweniencji europejskiej; pałał nienawiścią do obu dyktatorów: Stalina i Hitlera. W jednym z wywiadów mówił: „Nikt nie miał na mnie większego wpływu niż Hitler, który przekonał mnie, że człowiek nie może ignorować polityki, a w szczególności nie może w niej nie dostrzegać najgorszego zła”. Swoje polityczne poglądy wywodził z głębokiego przeświadczenia, iż przyszłość jest nieprzewidywalna. Oddawał się swej pracy w bezgranicznym przekonaniu, że rozwój energetyki atomowej, broni jądrowej, badań nad reakcją syntezy jest rzeczą nieuchronną i że nikt nie jest w stanie temu zapobiec. Wszystkimi siłami dążył, by w wyścigu do zbudowania broni termojądrowej, Stany Zjednoczone okazały się na pierwszej pozycji. „Co by się stało – pytał – gdyby Stalin posiadał bombę wodorową, a my byśmy jej nie mieli?”. Zapewne nadal, jak w przeszłości, żywi niemal mesjanistyczną wiarę w nieodzowność wszechstronnej obrony Stanów Zjednoczonych i utrzymania jej militarnej przewagi w świecie. Można sądzić, że stało się to powodem jego sprzeciwu wobec traktatu o zakazie broni jądrowej. Po upadku Związku Sowieckiego, nie zważając na zakończenie zimnej wojny, ciągle usilnie pobudzał do rozwijania zaawansowanej, obronnej technologii. Należy do grona najwybitniejszych inspiratorów tzw. „Strategicznej Inicjatywy Obronnej”, którą zapoczątkował prezydent Ronald Reagan.

8.3. Stanisław Ulam



Pewnej nocy 1946 r. – wówczas profesor na Uniwersytecie Południowej Kalifornii – doznał obezwładniającego bólu głowy. Nie był w stanie wyartykułować słowa, gdyż stracił mowę. Przypadek, jak się okazało, był wyjątkowo różny. Wkrótce, z rozpoznaniem zapalenia mózgu znalazł się w szpitalu na stole operacyjnym, gdzie po zabiegu i zaaplikowaniu penicyliny, zapadł w stan śpiączki. Jednakże wszelkie obawy o sprawność jego umysłu okazały się płonne; wyzdrowiał i stworzył kilka najcenniejszych swych prac, i co najważniejsze, dokonał przełomu w budowie bomby termojądrowej. Aczkolwiek, jak wspominał jego kolega Gian Carlo Rota, profesor w Massachusetts Institute of Technology: „W późniejszym okresie dla tych, co znali go i jego idee, którymi tryskał obficie, a które były fascynujące ponad to wszystko, czego przedtem i potem doświadczyłem – zmiany w jego osobowości stały się oczywiste. Słabość fizyczna, połączona z nadzwyczajną kreatywną imaginacją stanowiły dla Stana Ulama dramat. Wkrótce po spotkaniu z nim zrozumiałem, że jego dramat w naszych rozmowach należał do tematów zakazanych. Ale on wiedział, że ja wiem, a ja wiedziałem, że on wie, iż ja wiem”.



Prezydent John Kennedy wymienia uścisk dłoni ze Stanisławem Ulamem, Los Alamos 1962 r.

Stanisław Marcin Ulam (1909–1984) urodził się we Lwowie, w zamożnej, bankiersko-advokackiej rodzinie. W szkole przejawiał zainteresowania astronomią i fizyką. Pasjonował się szczególnie teorią względności Einsteina. Ponieważ wymagało to jednak znajomości matematyki, więc w wieku 14 lat zaczął się w nią zagłębiać samodzielnie, z książek. Mając tak szerokie zainteresowania, w 1927 r. wstąpił na Politechnikę Lwowską, gdzie sześć lat później pod kierunkiem Kazimierza Kuratowskiego uzyskał dwa dyplomy: magistra i doktora. W 1935 r. John von Neumann²⁹ zaprosił go na trzy miesiące do Institute of Advanced Studies w Princeton. Tam zapoznał się z G.D. Birkhoffem³⁰, który zaofiarował mu pracę w Harvardzie. Wszakże więzi z Polską nie zerwał. Latem przyjeżdżał w odwiedziny do rodziny, spotykał się z kolegami matematykami, by w kawiarniach – jak to wówczas było wśród nich przyjęte – móc godzinami prowadzić naukowe dysputy. W 1939 r., na miesiąc przed wybuchem wojny, wraz z szesnastoletnim bratem Adamem opuścił Polskę na zawsze. Odprawiali ich ojciec i stryjek, których widzieli ostatni raz. Razem z pozostałymi członkami ich rodziny zginęli w czasie Zagłady.

W latach 1941–1943 Stanisław Ulam był profesorem na Uniwersytecie Wisconsin w Madison. Po tym, gdy w 1943 r. otrzymał obywatelstwo amerykańskie, J. Von Neumann zaproponował mu ważną pracę w dziedzinie militarnej. Spotkali się potajemnie na jakimś dworcu – wspominał po latach. „Byli tam również dwaj faceci, chyba ochraniarze, wyglądający na „goryli”. Dyskutowaliśmy niektóre zagadnienia z dziedziny matematyki i fizyki, a także ich ważność”. Taki był początek pracy w Los Alamos. „Parę miesięcy po tym, wraz z żoną, pierwszy raz znalazłem się w bardzo osobliwym miejscu” – wspominał. Pracował tam nad bombą wodorową. Rozwiązał jeden z najtrudniejszych problemów, jakie wystąpiły przy jej konstrukcji: zagadnienie inicjacji reakcji syntezy. Zaproponował mianowicie zastosować energię wybuchu bomby atomowej do wywołania fal uderzeniowych i kompresji termojądrowego paliwa, a ponadto odkrył sposób ogniskowania fal, by ich energia mogła zapoczątkować termojądrową reakcję. Tam też zastosował metodę Monte Carlo do poszukiwania rozwiązań matematycznych problemów, na drodze statystycznego próbkowania za pomocą liczb

²⁹ John von Neumann (1903–1957, wybitny węgiersko-amerykański matematyk; zajmował się fizyką kwantową, logiką, meteorologią i komputerami.

³⁰ George David Birkhoff (1884–1944), znany amerykański matematyk, prezes American Mathematical Society, dziekan wydziału w Harvardzie, prezes American Association for the Advancement of Science.

pseudolosowych. Sposób ten jest obecnie szeroko stosowany w oprogramowaniu matematycznym komputerów. Obdarzony nieprzeciętną inteligencją i pamięcią, zajmował się także zagadnieniami z pogranicza matematyki, fizyki i biologii; rozmyślał nad jądrowym napędem statków powietrznych. G.C. Rota tak charakteryzował jego umysł: „Pamięć Ulama jest przechowalnią tysięcy historii, opowiadań, dowcipów, epigramów, spostrzeżeń, zagadek, powiedzonek, uwag, wniosków, sloganów, formuł, wykresów, cytatów, limeryków, streszczeń, złośliwości, epitafiów i nagłówek”. Dużą pomoc w redagowaniu tekstów Ulama okazała jego żona. Według jej słów, mąż był „...człowiekiem słowa mówionego, werbalistycznym. W czasie, gdy nie rozmyślał, najbardziej lubił rozmowy, dyskusje, argumentowanie, wymianę zdań z przyjaciółmi i kolegami... Branie do ręki pióra znosił boleśnie. Na przeszkodzie stały jego umysł i oczy; umysł, ponieważ pracował szybciej niż jego palce, a oczy, dlatego, że jedno dotknięte było krótkowzrocznością, a drugie – dalekowzrocznością...”.

Był członkiem National Academy of Sciences w Waszyngtonie, American Academy of Arts and Sciences, American Philosophical Society i kilku innych towarzystw. Pracował na wielu uniwersytetach, min.: na Uniwersytecie Południowej Kalifornii, w Harvardzie, w Massachusetts Institute of Technology.

Stanisław Ulam zmarł nagle w pełni sił, na zawał serca, 13 maja 1984 r., w Santa Fe.

9. PERSPEKTYWY ROZWOJU BRONI CZWARTEJ GENERACJI

Pomimo istniejących technologicznych barier broń jądrowa znalazła się w posiadaniu krajów rozwijających się. W latach 50. i 60. ZSRR „obdarował” reaktorami badawczymi tzw. kraje demokracji ludowej, w tym również Koreańską Republikę Ludowo-Demokratyczną. Podobne reaktory zakupiły w Kanadzie Indie, a Irak³¹ – we Francji (rys. 16). To właśnie owe reaktory, mające służyć badaniom naukowym, stały się narzędziem do produkcji bomb atomowych. Także dzięki pomocy ZSRR, 16 października 1964 r. Chiny dokonały wybuchu swej pierwszej bomby atomowej na pustyni Sinkiang, 150 km na północny zachód od jeziora Łob-nor.

Dzisiaj wiele państw korzystających z zaawansowanych technologii, szczególnie zaś takie kraje jak Niemcy, Indie, Izrael, Japonia i Pakistan, a także Chiny, są w stanie wyprodukować nie tylko bomby atomowe, ale także bomby wodorowe. Dowiodły tego Indie, które w maju 1998 r. ogłosiły o przeprowadzeniu doświadczenia z bombą wodorową o nowoczesnym rozwiązaniu.

Badania nad bronią jądrową idą obecnie głównie w kierunku ograniczenia możliwości wybuchów do zakresu od 1 do 100 t równoważnika trotylowego TNT. Jest to przedział, który zgodnie z Traktatem o Powszechnym Zakazie Prób z Bronią Jądrową (Traktat) – odgranicza broń konwencjonalną od jądrowej. Taka mało wydajna broń, zakwalifikowana jako broń masowego rażenia, jest zaliczana do czwartej generacji; wykorzystuje zjawiska fizyczne i materiały, do których należą: wyzwianie energii z reakcji rozszczepienia w stanach podkrytycznych, kompresja magnetyczna, pierwiastki transuranowe, antymateria, izomeria jądrowa, wodór metaliczny i superlasery (tzn. ultrawydajne lasery o gęstości strumienia energii większej od 10^{19} W/cm²). We wszystkich pięciu państwach atomowych (a także w kilku innych krajach uprzemysłowionych takich jak Niemcy i Japonia) prowadzone są szerokie badania nad iner-

³¹ 7 czerwca 1981 r., znajdujący się w budowie iracki reaktor, w wyniku ataku lotnictwa izraelskiego został zniszczony.



Rys. 16. Saddam Husajn (drugi z lewej strony) podczas rozmów we francuskim ośrodku atomowym w 1975 r.;
(pierwszy z prawej, wówczas członek parlamentu – Jacques Chirac)

cyjnym utrzymywaniem fuzji (IUF) i innymi procesami fizycznymi w celu stworzenia podstaw rozwoju czwartej generacji broni jądrowej. W ciągu ostatnich kilku lat we wszystkich tych badaniach dokonano znacznego postępu. Unowocześnianie konstrukcji urządzeń do badań mikrowybuchów z wykorzystaniem IUF zarówno w państwach atomowych, jak i nieatomowych, nadaje wyścigowi zbrojeń nowego bodźca. Świat stanął w obliczu ryzyka, iż niektóre kraje zaopatrzą się w broń jądrową czwartej generacji, omijając etap uzbrajania się w broń jądrową starszej generacji. Jest zatem wiele powodów do przekazania o niej wiedzy szerszemu ogółowi. Główny powód jest prosty: fizyczne podstawy budowy tej broni nie stanowią już tajemnicy. Państwa lub organizacje chcące ją budować mogą z łatwością znaleźć potrzebną do tego celu podstawową informację w rozpowszechnianej literaturze. Dostępność zaś komputerów, nawet o średniej wydajności, stanowi dostateczne narzędzie umożliwiające jej skonstruowanie. Nie istnieją już dziś powody, dla których posiadanie wiedzy powinno być przywilejem ekspertów rządowych, pracujących za żelazną kurtyną sekretności.

9.1. Broń czwartej generacji a Traktat o Powszechnym Zakazie Prób z Bronią Jądrową

Zatwierdzony przez ONZ Traktat przyczynił się do zakończenia próbných wybuchów. Jednakże ze względu na to, że nie zakazuje doświadczeń laboratoryjnych, broń jądrowa nadal będzie rozwijana za pomocą licznych, udoskonalonych w ciągu ostatnich czterdziestu lat technik, które w obecnej dobie mogą z powodzeniem zastąpić doświadczenia na poligonach. Mają one wielką przewagę nad tradycyjnymi metodami, ponieważ pozwalają analizować wiele zachodzących w broni jądrowej procesów, których rozumienie jest nadal niedostateczne. W istocie brak doświadczalnych wybuchów, w połączeniu z ogromnymi możliwościami laboratoriów, stwarza sposobność do wyprodukowania nowej broni jądrowej.

Istnieją dwie klasy eksperymentów jądrowych, dozwolonych przez Traktat: doświadczenia podkrytyczne i jądrowe mikrowybuchy. Podczas negocjacji w sprawie Traktatu pięć państw atomowych spotykało się kilkakrotnie potajemnie, dwustronnie lub wielostronnie, aby sprecyzować sens używanych w nim terminów. W szczególności wymieniały między sobą informacje o tym, co Traktatem miałyby być dozwolone lub zakazane oraz wyjaśniały znaczenie zwrotu „Działalność nie zakazana traktatem”. Wprawdzie dokładna jego wykładnia jest tajna, to jednak wiadomo, że ważną kwestię stanowiło pojęcie tzw. „prób hydronuklearnych”³², tzn. doświadczeń z bronią jądrową (lub z

³² Termin hydronuklearny (termin angielski hydronuclear tests) odnosi się do systemu, w którym strumień masy opisują równania hydrodynamiki, podobnie jak w przypadku kompresji materiałów rozszczepialnych, stosowanych w

wysoko wybuchowym stymulatorem broni wodorowej), ograniczone do procesów powielania neutronów w stanach podkrytycznych lub nieznacznie nadkrytycznych. Aby Traktat mógł być przyjęty przez większość państw ONZ, państwa atomowe uzgodniły zakaz „prób hydronuklearnych”, w których materiały rozszczepialne osiągają stany krytyczne. Innymi słowy, każda próba jądrowa, w której materiał rozszczepialny pozostaje w stanie podkrytycznym jest przez Traktat dozwolona. W szczególności stan taki pozwala na przeprowadzanie badań właściwości materiału rozszczepialnego przy dowolnym ciśnieniu i gęstości, pod warunkiem iż użyte próbki materiału nigdy nie osiągną stanu krytycznego.

Legalność mikrowybuchów³³, czyli detonacja milimetrowej wielkości elementów z materiału rozszczepialnego i/lub termojądrowego, jest oczywiście głównie wybiegiem zastosowanym w Traktacie. Jednakże pomimo tego podczas negocjacji przedsięwzięto ograniczone jedynie wysiłki (z wyjątkiem Indii), by Traktatem objąć metodę inercyjnego utrzymywania fuzji (IUF) i różnego rodzaju mikrowybuchy. Powodem, dla którego tak się stało, była niechęć państw atomowych do zaakceptowania ograniczeń w tej dziedzinie badań oraz wola większości państw ONZ wprowadzenia w Traktacie przede wszystkim zakazu stosowania broni masowego rażenia. Brak w Traktacie wzmianki o jądrowych mikrowybuchach nie jest jedynym zagadnieniem tam pominiętym. Na przykład w żadnym traktacie dotyczącym kontroli uzbrojenia, o syntezie termojądrowej nie ma wzmianki wprost. Traktat nie przewiduje ograniczeń w badaniach i rozwoju IUF. Fakt, że w tym międzynarodowym Traktacie wzięto pod uwagę w zasadzie standardowe procesy jądrowe, bez ograniczenia rozwijania technik bardziej wyrafinowanych, o potencjalnych możliwościach ich militarnego zastosowania, stanowi poważny powód do troski.

9.2. Urządzenia do inercyjnego utrzymywania fuzji (IUF)

Dzisiaj urządzenia do inercyjnego utrzymywania fuzji należą do najważniejszych urządzeń badawczych³⁴ w nowoczesnym laboratorium, używanym przez konstruktorów broni. Umożliwiają one, w warunkach laboratoryjnych, dokonywanie symulacji wybuchów termojądrowych o mocy kilku kg TNT. Z militarnego punktu widzenia, IUF otwiera perspektywy szybkiego rozwoju całkowicie nowych rodzajów broni jądrowej. Wynika to z faktu, że możliwości transportu konwencjonalnych wysoko wybuchowych ładunków jądrowych są ograniczone. Na przykład pocisk raketowy „Tomahawk” przenosi głowicę o wadze 120 kg, a typowa duża jądrowa lotnicza bomba waży od 500 do 2000 kg. Ponieważ element paliwowy w urządzeniu IUF wynosi zaledwie ułamek grama, przeto materiały wybuchowe na podstawie IUF zrewolucjonizują działania wojenne³⁵. Wyposażone w precyzyjne mechanizmy naprowadzające, małe i lekkie głowice, skonstruowane na podstawie IUF, byłyby zdolne do zniszczenia właściwie wszystkich celów i uczynienia, że istniejące typy broni jądrowej stałyby się bezużyteczne. Główna trudność polega dzisiaj na zastąpieniu laserów lub akceleratorów cząstek (używanych do wytworzenia w paliwie (DT) wysokiej kompresji i temperatury) przez urządzenia dostatecznie zminiaturyzowane. Na rys. 17 pokazano uproszczony schemat udoskonalonego urządzenia IUF. Target z materiału (DT) o wadze 5 mg umieszczony jest we wnęce.

Typowe urządzenia tego rodzaju (używane do symulacji wielkich ładunków wybuchowych), znajdujące się obecnie w stadium konstrukcji, będą zawierały od 1 µg do 1 mg (DT). Inna koncepcja, tzw. działania pośredniego, odnosi się do sytuacji, w której energia pierwotna (źródła ciężkich jonów, antyprotony i lasery) nie jest przekazywana bezpośrednio do zewnętrznej warstwy paliwa (targetu), lecz w fazie początkowej ulega (we wnęce) zamianie na promieniowanie X. Dzięki urządzeniu IUF możliwe będzie badanie fizyki wybuchu termojądrowego w warunkach odpowiadających sytuacji w pełnej skali. Inaczej mówiąc, za pomocą 1–5 mg (DT) można będzie odwzorować zjawiska fizyczne

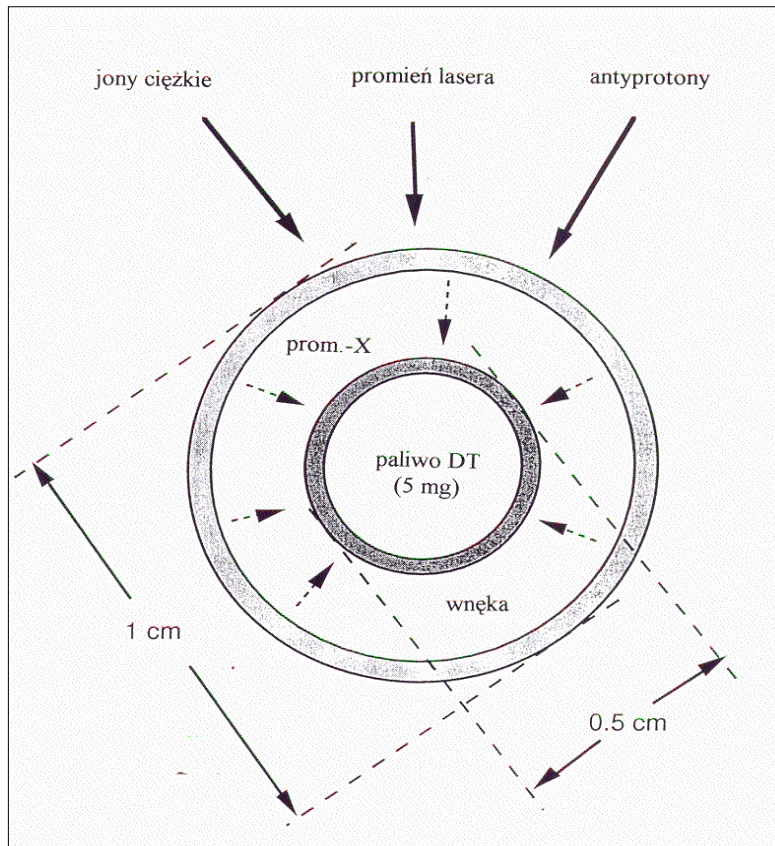
urządzeniach wysoko wybuchowych z wykorzystaniem reakcji łańcuchowej. W doświadczeniach hydrodynamicznych materiał stały pod wpływem fali uderzeniowej (np. z wybuchu chemicznego) zachowuje się jak ciecz. Jeśli przy tym bierze w nim udział materiał rozszczepialny, to nazywa się go – doświadczeniem hydronuklearnym.

³³ Moc mikrowybuchów waha się w przedziale od 0,1 do 10 t TNT.

³⁴ Zawarta w nim masa paliwa (deuteru i trytu) wskutek wytworzonego ciśnienia sięgającego 10^{17} Pa, ulega kompresji doprowadzając materiał w ciągu nanosekund do gęstości od 1000 do 10000 razy większej od normalnej. Pod koniec tego okresu szybkość implozji przekracza $3 \cdot 10^5$ m/s. Przy maksymalnej kompresji (znajdującego się w postaci zimnej plazmy) paliwa energia fali udarowej staje się dostateczna do wytworzenia w środku paliwa temperatury, przy której następuje reakcja syntezy.

³⁵ 10 mg paliwa (DT) wytwarza 3,4 GJ, czyli 810 kg TNT.

wybuchu bomby wodorowej o mocy 100–500 kt! Nowy typ broni opracowanej na podstawie badań IUF będzie należeć do czwartej generacji broni jądrowej, tzn. do urządzeń wybuchowych, opartych na wykorzystaniu atomowych i jądrowych zjawisk, które nie są zakazane przez Traktat.



Rys. 17. Uproszczony schemat urządzenia IUF (wg dokumentu Departamentu Energetyki USA, odtajnionego 01.05.94)

9.3. Urządzenia podkrytyczne i mikrowybuchy materiałów rozszczepialnych

Całkowita liczba neutronów w urządzeniu podkrytycznym, jaka się ustala po wprowadzeniu doń na początku $n(0)$ neutronów, opisuje równanie:

$$n(\infty) = n(0) / (1 - k) \quad (22)$$

Widać, że gdy współczynnik mnożenia k jest bliski jedności, to wprowadzając do urządzenia, w sposób impulsowy, początkową liczbę neutronów, można wytworzyć wielką liczbę rozszczepień, czyli wygenerować określoną ilość energii. Technika ta jest zwana spalaniem w stanie podkrytycznym. Aby zrozumieć znaczenie tej metody dla wybuchów materiału rozszczepialnego, należy zauważyć, iż w normalnej bombie rozszczepieniowej masę plutonu trzeba doprowadzić do stanu wysoko nadkrytycznego, by uzyskać szybko narastającą reakcję łańcuchową. Oznacza to, że pluton powinien być poddany większej kompresji niż wymaga tego stan krytyczny. Na przykład pastylka (element paliwowy) z plutonu o wadze 1 g osiąga stan krytyczny przy gęstości ok. 100 razy większej od gęstości normalnej, a do dalszego zwiększenia mocy potrzebna jest kompresja dziesięciokrotnie większa. Z drugiej strony, w urządzeniu podkrytycznym wystarczy osiągnąć k bliskie jedności, by wywołać

wybuch materiału rozszczepialnego o masie kilku gramów³⁶. Jednakże w porównaniu z normalnymi wybuchami jądrowymi, wadą urządzenia podkrytycznego jest to, że potrzebuje ono, jako źródła, bardzo wydajnego generatora neutronów. Stosowanie zewnętrznego źródła stanowi poważny problem, praktycznie jest prawie niemożliwe zarówno ze względu na trudności z jego umieszczeniem, jak i zogniskowaniem we właściwym czasie wiązki neutronów na małym targecie. Stąd powstała myśl, by jako źródło neutronów wykorzystać reakcję (D-T), lokując deuter i tryt w środku materiału rozszczepialnego lub w reflektorze.

Podsumowując można stwierdzić, iż krytyczne lub podkrytyczne urządzenia do mikrowybuchów materiału rozszczepialnego, w praktyce mogą posłużyć jako urządzenia o małej mocy wybuchu lub jako człony pierwsze służące do wywołania kompresji ładunku materiału rozszczepialnego, czy termojądrowego o wysokiej mocy. Aby tego dokonać, potrzebny jest pomysł na wytworzenie wymaganej kompresji, a także wygodnego źródła neutronów do zainicjowania reakcji rozszczepienia. Jak dotąd, rozwiązania tego problemu nie widać. Zewnętrzne źródło neutronów jest niepraktyczne. Poszukuje się innych metod zapoczątkowania reakcji rozszczepienia takich jak ogniskowanie na targecie wiązki elektronów, protonów, antyprotonów itp. Potrzebny jest do tego kompaktowy akcelerator. Na przykład w przypadku elektronów superlaser może je przyspieszać do energii ok. 20 MeV, wystarczającej do emisji neutronów z reakcji rozszczepienia, wywołanej oddziaływaniem elektronów i fotonów na materiał tarczy. Inną metodą otrzymywania początkowych neutronów, która może uwolnić konstruktorów od stosowania superlaserów lub akceleratorów, jest skierowanie na target małej ilości antyprotonów; wystarczy do tego ilość mniejsza niż mikrogram tych cząstek. Zapewne najbardziej ambitne plany badań nad mikrowybuchami materiału rozszczepialnego za pomocą urządzeń podkrytycznych ze źródłem antyprotonowym, są realizowane w USA. Rozwijane są także badania z użyciem lasera. Niestety brak jest na ten temat publikacji lub są one utajnione.

9.4. Pierwiastki transplutonowe i superciężkie

Zainteresowanie kręgów wojskowych pierwiastkami transplutonowymi³⁷ wynika stąd, iż są one na ogół rozszczepialne, a ich masy krytyczne są mniejsze lub o wiele mniejsze (jak w przypadku jąder superciężkich) od masy krytycznej plutonu. Dzieje się tak, ponieważ pierwiastki ciężkie posiadają większe przekroje czynne na rozszczepienie i emitują więcej neutronów na jedno rozszczepienie. Na przykład masa krytyczna izotopu kiuru ^{245}Cm stanowi jedną trzecią masy ^{239}Pu . Wszakże te zalety należy rozpatrywać na tle ich takich specyficznych cech, jak krótki czas życia, duży przekrój czynny na reakcje samorzutnego rozpadu, a także trudności wyprodukowania. Nawet w przypadku względnie lekkiego izotopu transplutonowego, jakim jest ^{245}Cm , który powstaje z oddziaływania neutronów prędkich na ^{244}Cm , techniczne problemy skonstruowania bomby są o wiele większe niż w przypadku czystego plutonu. Militarny potencjał tkwiący w pierwiastkach transplutonowych jest zależny od ich dostępności, niskich kosztów produkcji i odpowiednich właściwości fizycznych przydatnych dla krytycznych i podkrytycznych urządzeń wybuchowych. W szczególności, z praktycznego punktu widzenia, byłoby rzeczą pożyteczną odkrycie długożyciowego, superciężkiego transplutonowca o masie krytycznej rzędu gramów, tzn. trzy rzędy mniejszej od masy zwykłych materiałów rozszczepialnych. Ale nawet w przypadku małych mas krytycznych pierwiastki superciężkie staną się użyteczne tylko wówczas, gdy będą dostatecznie stabilne. Wyniki teoretycznych badań są pod tym względem optymistyczne, przewidują bowiem istnienie „stabilnego obszaru” w pobliżu jąder o parametrach: $Z = 114$ i $N = 184$ ³⁸. W 1970 r. odkryto pierwiastek lorens (Lr) ($Z = 103$ i $N = 154$), a później w Berkeley (USA) lub w Darmstadt (Niemcy) – pierwiastki o liczbach od $Z = 104$ do $Z = 109$. Przełom nastąpił w 1993 r., kiedy to zespół amerykańsko-rosyjski w Dubnej odkrył ciężki izotop pierwiastka o $Z = 108$ i $A = 297$ i czasie życia: 19 ms. Do końca 1994 r. w Niemczech otrzymano pierwiastki: $Z = 110$ i $Z = 111$. Ostatnie wyniki prac teoretycznych pokazują, że prawie 400 superciężkich jąder zawartych w przedziale od $Z = 106$ do $Z = 136$, powinny posiadać czasy połowicznych zaników większe od Pu – 239. Problem tkwi w tym, że ich otrzymanie może być wyjątkowo trudne, jeśli w ogóle możliwe. W styczniu 1999 r., zespół amerykańsko-rosyjski w Dubnej otrzymał pierwiastek: $Z = 114$; $A = 289$. Znajduje się on w przewidywanym „stabilnym obszarze”;

³⁶ Tyko w 2000 r. Rosja przeprowadziła na poligonie Nowej Ziemi trzy tzw. podkrytyczne wybuchy. Testy tego rodzaju były dokonywane także w USA.

³⁷ Pierwiastki o liczbie atomowej większej od 94.

³⁸ Z – liczba atomowa; N – liczba neutronów; $N = A - Z$, gdzie A – liczba masowa pierwiastka.

jego okres połowicznego zaniku wynosi 30 s. W tym samym czasie fizycy z Lawrence Berkeley National Laboratory wyprodukowali nowy superciężki pierwiastek: $Z = 116$. Wytworzenie w 1999 r. dwóch nowych pierwiastków (w tym jednego o czasie połowicznego zaniku ok. 30 s) dowodzi, że dalsze otrzymywanie pierwiastków syntetycznych w tzw. „obszarze stabilnym” z czasem życia wielu lat powinno być możliwe.

9.5. Antymateria

Z reakcji materia–antymateria uzyskuje się więcej energii na jednostkę masy niż każdym innym sposobem. Na przykład reakcja proton–antypoton, w której wyniku następuje anihilacja tych cząstek, uwalnia 275 razy więcej energii (w postaci energii kinetycznej naładowanych cząstek) niż reakcja rozszczepienia lub syntezy (DT). Zjawisko anihilacji rozpoczyna się samoczynnie, gdy tylko antymateria znajdzie się w pobliżu materii, bez konieczności tworzenia masy krytycznej, jak w przypadku reakcji rozszczepienia i bez „zapłonu”, czego wymaga reakcja termojądrowa. Nie jest więc rzeczą zaskakującą, że koncepcja wykorzystania takiego źródła energii jest od dziesięcioleci przedmiotem zainteresowań uczonych. Zarówno Edward Teller, jak i Andriej Sacharow, w swoich publikacjach przejawiali znaczne zainteresowanie właściwościami anihilacji antymaterii, który to proces po reakcji rozszczepienia i syntezy termojądrowej stwarzał nadzieję na rozwój nowej generacji broni jądrowej. Istnieje teza o tym, że jedynym praktycznym zastosowaniem technologii opartej na wykorzystaniu energii anihilacji pozostaje dziedzina militarna.

Antymateria powstaje, gdy protony przyspieszone w akceleratorze do prędkości bliskiej prędkości światła oddziałują na materiał targetu³⁹. Pierwszy raz antyprotony zaobserwowano w 1955 r. w Berkeley. Odkryta została również możliwość zbudowania bomby wodorowej lub neutronowej, w której od trzech do pięciu kilogramów plutonu w członie pierwszym zostałyby zastąpione jednym mikrogramem antywodoru. Rezultatem byłaby tzw. „czysta” bomba, tzn. (wobec braku materiału rozszczepialnego) praktycznie pozbawiona radioaktywnych odpadów. Aby zastosowanie do celów militarnych stało się realne, potrzebna by była technologia produkcji antyprotonów w ilości niezbędnej co najmniej dla jednego zapalnika na dzień. Odpowiada to wydajności 10^{13} antyprotonów na sekundę, tzn. o sześć rzędów wielkości większej od obecnych możliwości CERN-u⁴⁰. Istnieją wszakże liczne drogi jej zwiększenia.

W ciągu ostatnich kilkunastu lat w dziedzinie zastosowania antymaterii wykonano wielką liczbę prac eksperymentalnych i teoretycznych. Dzisiaj badania nad antymaterią należą zapewne do najważniejszych i najbardziej dynamicznie rozwijających się programów badań nad czwartą generacją broni jądrowej.

9.6. Izomeria jądrowa

Dwa jądra o takiej samej liczbie masowej, lecz znajdujące się w różnych stanach energetycznych, z których jeden jest metastabilny, nazywają się izomerami. Z punktu widzenia militarnego, są one obiektem zainteresowania z trzech powodów. Po pierwsze, mogą otwierać drogę rozwojowi laserom promieniowania gamma. Po drugie, mogą się sprawdzić, jako użyteczny materiał wybuchowy i po trzecie, można się spodziewać, iż niektóre izomery rozszczepialne (w przypadku rozszczepień wywołanych za pomocą impulsów elektrycznych i laserów) posiadają progową energię do pewnego stopnia niższą niż zwykle materiały rozszczepialne.

Użyteczna energia izomerów jądrowych zawiera się w przedziale: od kilku kJ/g do ok. 1 GJ/g, tzn. jest bliska wartości uzyskiwanej z reakcji jądrowych (np. z rozszczepienia 80 GJ/g). Przykładowo energia uwolniona z metastabilnego jądra uranu $^{235}\text{U}^m$ (73 eV i $T_{1/2} = 25$ min) wynosi $30 +$ kJ/g, a z niobu: $^{93}\text{Nb}^m$ (30,7 keV i $T_{1/2} = 13,6$ a) – 32 MJ/g. W porównaniu z istniejącymi jądrowymi materiałami wybuchowymi zaletą izomerów jest to, że ich zastosowanie może być pozbawione

³⁹ Antyprotony powstają wskutek wzajemnego oddziaływania protonów. Jeśli padający proton zostanie przyspieszony do energii nie mniejszej od 5,6 GeV to wskutek przemiany powstają dodatkowo cząstki, zgodnie z zależnością: $E = mc^2$.

⁴⁰ Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (Europejskie Centrum Badań Jądrowych, w Genewie).

promieniotwórczych skażeń. Ponadto dodatkowa, potencjalna korzyść tkwi w tym, że ogromne zasoby energii można będzie magazynować bez obawy o powstawanie radioaktywnych produktów przemian jądrowych. Magazynowana bowiem energia jest energią wzbudzenia jądra metastabilnego (a nie energią rozszczepienia). Należy mieć nadzieję na znalezienie metody jej kontrolowanego uwolnienia.

9.7. Materiały superwybuchowe i metaliczny wodór

Wysoko wybuchowe materiały chemiczne o maksymalnej gęstości ok. 2 g/cm^3 posiadają energię właściwą ok. 5 kJ/g . Odpowiada to maksymalnej gęstości energii ok. 10 kJ/cm^3 . Natomiast chemiczne materiały superwybuchowe osiągają najmniej 100 kJ/cm^3 . Odkrycie więc superwybuchowych materiałów będzie miało dramatyczne konsekwencje dla rozwoju technologii broni. Na przykład w przypadku bomby rozszczepieniowej (lub bomby wodorowej w członie pierwszym) dolne granice ciężaru i rozmiarów są określone ilością i objętością chemicznego materiału wybuchowego zastosowanego do wywołania implozji materiału rozszczepialnego i otaczającego go reflektora. Waga materiału rozszczepialnego jest zależna od wielkości wybranej mocy. Tak np. waga materiału wysoko wybuchowego potrzebna do wywołania implozji 2–3 kg plutonu, otoczonego cienkim stalowo-berylowym reflektorem, wynosi ok. 10–20 kg. W przypadku zaś użycia materiału superwybuchowego jego waga w urządzeniu wybuchowym będzie mniejsza niż waga materiału rozszczepialnego. Podobnemu skurczeniu ulegnie objętość rdzenia urządzenia wybuchowego, a w rezultacie ogólna jego waga i rozmiary. Ponieważ rozmiar i masa bomby wodorowej wskutek zmniejszenia się członu pierwszego ulegną redukcji, przeto będzie to miało wielki wpływ na technologię broni termojądrowej.

Materiałów superwybuchowych dotąd nie odkryto. Aczkolwiek były pogłoski, że w ZSRR (szczególnie po jego upadku) jakoby wyprodukowano, jedyny w swoim rodzaju, nierozszczepialny materiał wybuchowy o wielkiej sile, pod zakodowaną nazwą – „czerwona rtęć”. W tym może być jakieś źdźbło prawdy; „czerwoną rtęć” można odnieść do pewnego rodzaju izomeru atomowego⁴¹. Jednakże znane izomery atomowe posiadają gęstości energii nie wiele większe od wysoko wybuchowych materiałów chemicznych.

Obiecującą metodą otrzymywania syntetycznego materiału superwybuchowego jest metoda kompresji. Jeśli np. materiał poddać dostatecznie wielkiemu ciśnieniu (proces endoenergetyczny) – wówczas elektrony zostaną wyciśnięte ze swych powłok w atomie, co doprowadzić może do przemiany fazowej i przejścia do nowego stanu energetycznego. W przypadku gdyby ów nowy stan był metastabilnym, to zgromadzona energia może się stać praktycznie użyteczna. W szczególności, gdyby jej uwalnianie odbywało się w sposób kontrolowany, to takiego materiału można by było używać jako paliwa do napędu samolotów lub rakiet kosmicznych. W sytuacji przeciwnej byłby to raczej materiał wybuchowy, a nie paliwo. Najprostszym i powszechnie dostępnym materiałem jest wodór. Jednakże, pomimo kilkudziesięciu lat badań, jego wytworzenie w postaci metalicznej jest ciągle kwestią otwartą. Pierwsze doniesienie o otrzymaniu metalicznego wodoru pojawiło się w Rosji. Druga rosyjska informacja ukazała się w 1975 r., kiedy to metaliczny wodór został otrzymany przez zespół pracujący z diamentowym „kowadełkiem” w temperaturze $4,2^\circ\text{K}$. W tym samym czasie pojawiło się doniesienie uczonych japońskich.

Potencjalna przydatność metalicznego wodoru wynika z pewnych jego właściwości. Wskutek wysokiej temperatury Debye'a (2000–30000K) może on być nadprzewodnikiem, a także atrakcyjnym paliwem dla rakiet. Wodór metaliczny posiada energię 400 kJ/mol , czyli 300 razy większą od obecnie dostępnych, najlepszych paliw lotniczych, w tym także paliw dla silników odrzutowych. Charakterystyczne parametry wodoru metalicznego są następujące: energia właściwa 5 kcal/g , gęstość ok. 1.3 g/cm^3 . Jako materiał wybuchowy jest 35 razy silniejszy niż TNT. Duża gęstość czyni go również przydatnym do broni jądrowej.

W 1996 r. uczonym z laboratorium w Livermore udało się (przy ciśnieniu 1,4 Mbar) odkryć proces ciągłego przechodzenia wodoru z postaci półprzewodnikowej do metalicznej. „Scientific American”, w maju 2000 r. pisał: „Jeśli zmagazynowaną energię można by było uwolnić nadzwyczajnie szybko, to metaliczny wodór mógłby być używany jako materiał wybuchowy”.

⁴¹ Izomer atomowy jest atomem, w którym elektron w ciągu długiego czasu pozostaje w stanie wzbudzonym.

10. SKUTKI

Zarówno wybuch atomowy, jak i termojądrowy powoduje cztery kategorie groźnych skutków: falę uderzeniową, promieniowanie ciepłe, promieniowanie jonizujące i promieniotwórcze skażenie. Spośród różnych rodzajów wybuchów: podwodnego, podziemnego, powierzchniowego i powietrznego, ten ostatni jest najbardziej dewastacyjny. Manifestuje się zjawiskami natychmiastowymi i opóźnionymi. Do natychmiastowych należy emisja przenikliwego promieniowania gamma i neutronowego. Natomiast efekty opóźnione, wywołane radioaktywnym opadem, przejawiają się w ciągu dłuższego czasu, mierzonego godzinami i latami.

Przy wybuchach na względnie niskich wysokościach od powierzchni ziemi uwolniona energia bomby rzędu kiloton TNT rozkłada się następująco: 50% przypada na falę uderzeniową; 35% generuje się w postaci promieniowania ciepłego o szerokim elektromagnetycznym widmie, łącznie ze światłem widzialnym, promieniowaniem podczerwonym, ultrafioletowym i niskoenergetycznym promieniowaniem X; 15% stanowi promieniowanie jonizujące, w tym 5% – głównie promieniowanie gamma i neutronowe, emitowane w ciągu pierwszej minuty po eksplozji; 10% jest udziałem energii resztkowego promieniotwórczego skażenia w postaci opadów.

10.1. Fala uderzeniowa

Jest przyczyną największych zniszczeń. Potwierdzają to eksplozje nad Hiroszimą i Nagasaki, gdzie to zjawisko było głównie odpowiedzialne za zrujnowanie miast i śmiertelne ofiary. Należy podkreślić, iż od fali uderzeniowej powietrza ginie mniej ludzi, niż od jej działania wtórnego, tzn. wskutek walenia się domów, ranienia unoszonymi podmuchem odłamkami itp. Wywołuje ją nagła zmiana ciśnienia, powstała pod wpływem promieniowania ognistej kuli. Na przykład przy wybuchu bomby o mocy 1 Mt, w odległości ok. 8 km od epicentrum prędkość wiatru osiąga 260 km/h, a nadciśnienie – ok. 0,35 kG/cm².⁴² W zasadzie budynki ulegają destrukcji w rezultacie gradientu ciśnienia, podczas gdy ludzie, drzewa, słupy – powalane są siłą wiatru.

Do obliczeń promienia działania burzącej siły fali uderzeniowej stosuje się, rekomendowany przez amerykańskich autorów, wzór oparty na zasadzie teorii podobieństwa:

$$R_r = R_w \cdot \sqrt[3]{E_r/E_w} \quad (23)$$

gdzie: E_w – równoważna energia trotylu (TNT), odpowiadająca „nominalnej”, wzorcowej energii bomby jądrowej; R_w – promień od epicentrum wybuchu bomby wzorcowej, wyznaczający odległość, na której powstaje przyrost ciśnienia; E_r – równoważna energia (TNT) bomby jądrowej, której działanie fali porównuje się z działaniem fali uderzeniowej od bomby wzorcowej; R_r – promień od epicentrum wybuchu bomby jądrowej, określający odległość, na której powstanie przyrost ciśnienia równy wywołanemu bombą wzorcową. Dla przykładu: fala uderzeniowa wywołana wybuchem bomby o energii 20 kt, wytwarza przyrost ciśnienia 0,4 kG/cm², w odległości $R_w = 1850$ m od epicentrum. Stąd fala uderzeniowa od bomby o dwukrotnie większej energii, wytworzy takie samo nadciśnienie w odległości: $R_r = 1850 \cdot \sqrt[3]{40/20} \approx 2400$ m.

⁴² 1 atm. = 1,03323 kG/cm².

Jak widać, gdyby „superbomba” o energii ok. 58 Mt, której eksplozji dokonał Związek Sowiecki w 1961 r., została zdetonowana np. nad Moskwą, to jej śródmieście zniknęłoby z powierzchni ziemi, a reszta leżałaby w gruzach, ogarnięta gigantycznym pożarem. Podobny los spotkałby także Nowy Jork wraz z jego drapaczami chmur. Nie byłoby ratunku nawet w głębokim metrze, gdyż wszystkie wyjścia zostałyby zasklepienie roztopioną masą gruntu i materiałów budowlanych. Po miastach pozostałyby obszary o średnicy około 20 km, pokryte zastygłą „lawą”, otoczone zwałami gruzu i popiołu.

W tej sytuacji nie dziwi, że w swoim czasie dowódca obrony cywilnej Nowego Jorku Herbert O’Brain zaproponował, by w ogóle zrezygnować ze schronów jako środków ochrony i zdać się wyłącznie na ewakuację.

Rozmiar zniszczeń wywołany falą uderzeniową zależy w dużej mierze od wysokości wybuchu nad poziomem ziemi.

10.2. Promieniowanie ciepłe

W ciągu milionowej części sekundy od momentu detonacji, ogromne ilości energii w postaci promieniowania X zostają pochłonięte przez otaczające powietrze. Doprowadza to do uformowania się świecącej, ognistej kuli o wielkiej temperaturze. Podczas wybuchu bomby o energii 1 Mt, w odległości 80 km, jest ona wielokrotnie jaśniejsza od słońca w południe. Ponieważ promieniowanie ciepłe rozchodzi się z prędkością bliską prędkości światła, to błysk i udar cieplny wyprzedzają falę uderzeniową o kilka sekund, podobnie jak światło wyładowania atmosferycznego jest dostrzegane przed towarzyszącym mu grzotem. Bezpośrednia obserwacja błysku jest groźna, gdyż może prowadzić do czasowej, a nawet trwałej utraty wzroku. W przypadku braku jakiegokolwiek ochrony przed tym promieniowaniem, w odległości 10–13 km od epicentrum, pojawiają się oparzenia skóry trzeciego stopnia; drugiego stopnia – w odległości: 13–16 km, a pierwszego stopnia – w odległości 16–19 km. Ponadto, promieniowanie ciepłe może bezpośrednio wzniesić pożary łatwo palnych materiałów. W szczególności – wskutek przenikania intensywnego promieniowania przez szyby – są na nie narażone domy.

10.3. Promieniowanie jonizujące

Od momentu wybuchu natychmiastowe promieniowanie gamma trwa względnie długo: 25% ogólnej jego ilości jest emitowane w okresie 0,2 s, 50% – w ciągu pierwszej sekundy, a 25% – w czasie 7 s. Natomiast uwalnianie neutronów odbywa się krócej, na szczęście ich zasięg porażającego oddziaływania jest mniejszy. Wpływ jonizującego promieniowania na zdrowie jest dość złożony: duże dawki mogą być śmiertelne, co zaś dotyczy małych dawek, to ich oddziaływanie jest ciągle przedmiotem kontrowersji uczonych. Przy wybuchu 1 Mt, niebezpieczny zasięg tego promieniowania jest ograniczony do ok. 2,5 km od epicentrum. Dla osób pozbawionych osłony – może być śmiertelne.

Wyjątkowe znaczenie posiada – będący skutkiem promieniowania jonizującego – tzw. elektromagnetyczny impuls (EMI). Wielu ekspertów wyraża pogląd, że atak nuklearny może się rozpocząć wybuchem bomby jądrowej na dużej wysokości – ok. 600 km i będzie dokonany z satelity. Detonacja bomby o mocy 1 Mt na tej wysokości nie spowoduje uszkodzenia żywych organizmów, nie wywoła znaczących, radioaktywnych opadów i nie stanie się zagrożeniem dla ludzi. Celem takiej eksplozji jest zniszczenie ważnych układów zasilania elektrycznego systemów obrony i łączności wojskowej. Środkiem do tego celu jest właśnie wytworzenie EMI. Jego oddziaływanie będzie obejmowało obszar o promieniu ponad półtora tysiąca kilometrów. EMI ma charakter fal elektromagnetycznych, podobnych do fal radiowych. W bardzo wysokiej temperaturze wybuchu nierozszczepialne fragmenty bomby ulegają stopieniu. Atomy nie uwalniają energii w postaci kinetycznej, lecz w postaci intensywnego promieniowania elektromagnetycznego. Składa się ono głównie z niskoenergetycznych promieni X, które są pochłaniane przez kilkumetrową warstwę otaczającego powietrza, co powoduje, iż podgrzewa się ono do ogromnie wysokiej temperatury, tworząc świecąca, rozpaloną do białości kulę, złożoną z powietrza i resztek gazów z eksplozji. Natychmiast po uformowaniu się, ognista kula w ciągu ułamka sekundy rozrasta się do ok. 120 m, by po 10 s osiągnąć średnicę ok. 160 m, a następnie się unosi, jak powietrzny balon. EMI różni się od normalnych fal radiowych dwójako. Po pierwsze, wytwarza większe natężenie pola elektrycznego. Podczas gdy sygnał radiowy indukuje w antenie odbiorczej tysięczną, a nawet mniejszą część wolta,

to EMI jest w stanie wygenerować tysiące woltów. Po wtóre, jest to jednostkowy impuls energii, który całkowicie zanika w ułamku sekundy; jest raczej podobny do impulsu elektrycznego pojawiającego się w czasie wyładowań atmosferycznych, ale wzrost napięcia odbywa się setki razy szybciej. Oznacza to, że większość zabezpieczeń urządzeń elektrycznych przed uderzeniami piorunów będzie działała za wolno, by mogła je skutecznie ochronić przed EMI. Z tego powodu zniszczeniu ulegnie różnego rodzaju aparatura elektroniczna, w tym m.in. układy zapłonowe samochodów, telefony i urządzenia łączności radiowej, transport lotniczy, systemy nawigacji i komputery. Szczególnie narażone zostaną urządzenia podłączone do sieci elektrycznej lub napowietrznych anten. Przeszanie funkcjonować system elektroenergetyczny, a radiostacje utracą zdolność transmisji.

10.4. Skażenia promieniotwórcze

Wybuchy bomb atomowych i wodorowych różnią się pod względem oddziaływania resztkowej promieniotwórczości. Nie ma dostatecznych podstaw, by sądzić, iż produkty reakcji termojądrowej będą promieniotwórcze, z wyjątkiem produktów reakcji rozszczepienia jąder atomów materiału zawartego w – będącej detonatorem – bombie atomowej, stanowiącej pierwszy człon bomby wodorowej. Jednakże z reakcji syntezy (np. deuter–tryt) powstaje kilkadziesiąt razy większy strumień neutronów niż w procesie rozszczepienia uranu lub plutonu. Dlatego produkty rozszczepienia będą miały mniejsze znaczenie niż wzbudzona aktywność powstała w wyniku oddziaływania neutronów. Większe skażenia pojawią się wskutek wybuchu powierzchniowego aniżeli atmosferycznego. Lotne, radioaktywne cząstki zanim opadną na ziemię, będą unoszone na dalekie odległości w zależności od lokalnych warunków meteorologicznych; istotny wpływ mogą mieć opady deszczu. Tego rodzaju zjawiska odegrały istotną rolę w rozprzestrzenianiu się skażeń podczas awarii reaktora w Czarnobylu. Wyjątkowość owej katastrofy, nie dającej się porównać do wybuchów bomb atomowych nad Hiroszimą i Nagasaki, polega na uwolnieniu ogromnej masy promieniotwórczych izotopów, jak również tzw. „gorących cząstek” (o wielkiej aktywności) i produktów kondensacji lub adsorpcji, które stały się przyczyną skażenia wielkiego terytorium. Obliczenia pokazują, iż są one równoważne skażeniom powstałym w efekcie powierzchniowego wybuchu bomby atomowej o energii 12 Mt.

10.5. Skutki doświadczeń na poligonie atomowym

17 września 1954 r. w „Prawdzie” ukazała się enigmatyczna informacja prasowej agencji TASS o przeprowadzeniu w ZSSR prób „jednego z rodzajów atomowej broni; otrzymano cenne wyniki, które pomogą sowieckim uczonym i inżynierom rozwiązać problemy ochrony przed atomowym atakiem”. Teraz wiemy, iż nie chodziło wcale o zbadanie jakiegoś rodzaju broni atomowej, lecz o przeprowadzenie po raz pierwszy ćwiczeń wojskowych z użyciem broni jądrowej. Zanim podjęto w tej sprawie decyzję, przebadano dwadzieścia ich wariantów. Spośród nadających się do tego celu miejsc, wybór padł na poligon Tocki, położony między Samarą a Orenburgiem. Bomba atomowa użyta w owych ćwiczeniach przeciw wojskom umownego przeciwnika o kryptonimie „zachodnie”, miała wydajność – 40 kt. Aby sprawdzić wszystkie cztery kategorie skutków, wybuchu dokonano na wysokości 350 m z samolotu Tu-4.

Ćwiczeniami, na których obecne było kierownictwo polityczne państwa na czele z Chruszczowem, a także I. Kurczatow, kierował marszałek G.K. Żukow. Zaproszeni zostali na nie ministrowie obrony zaprzyjaźnionych państw. Wzięli w nich udział dowódcy wszystkich rodzajów wojsk, marynarki i lotnictwa Związku Sowieckiego.

Plan ćwiczeń przewidywał przerwanie przez wojska „wschodnie” – przy pomocy korpusu strzelców – obrony przeciwnika, zmuszonej do działań w warunkach powstałych po atomowym ataku. Zastosowanie bomby atomowej odbywało się w ścisłej tajemnicy przed „zachodnimi”, a wojska atakujące dowiedziały się o tym na dzień przed rozpoczęciem owej „gorącej gry”. Uczestniczyło w niej 45 tys. żołnierzy, 600 czołgów i artyleryjskich samobieżnych pojazdów, 500 dział, 600 opancerzonych transporterów, 320 samolotów oraz 6 tys. ciągników i różnego typu samochodów. Wybrany rejon był poprzerywany lasami i szerokimi dolinami niewielkich rzek, co pozwalało dokonać wszechstronnej oceny oddziaływania wybuchu atomowego na obiekty inżynierskie, wojskową technikę, zwierzęta, a także wpływu rzeźby terenu i roślinności na rozprzestrzenianie się fali uderzeniowej, promieniowania świetlnego i jonizującego.

14 września, na dziesięć minut przed wybuchem, na dany sygnał mieszkańcy osiedli położonych w odległości 8–12 km od epicentrum winni byli położyć się na ziemi twarzą do dołu. Ludności zaś zamieszkanej w strefie oddalonej o 15–50 km, na 2 godziny przed zrzuceniem bomby polecono ukryć się w domach i przygotować do ewakuacji. Mieszkańców trzech wiosek, leżących 6 km od miejsca wybuchu ewakuowano. Jak się później okazało, wszystkie znajdujące się tam zabudowania – wskutek wywołanego wybuchem promieniowania cieplnego – uległy spaleni. Rejon dotknięty eksplozją trudno było rozpoznać: dymiła trawa i ogołoczone wzgórza, gdzieś biegały osmolone przepiórki, zniknęły gaiki. W pobliżu epicentrum, gdzie drzewa utraciły wszystkie konary, przechodziły nacierające oddziały piechoty, a w odległości 600 m od owego punktu przemieszczały się opancerzone transportery. W obszarze tego promienia roztaczał się przerażający widok: las był spalony do samych korzeni, leżały osmolone ciała doświadczalnych zwierząt, nie pozostał ani jeden stuletni dąb. Rozmieszczone w odległości 800 m różnego rodzaju pojazdy zostały spalone. Podobny los spotkał także oddalone o 1800 m, stojące bez pokryć samoloty; a zabezpieczone białymi plandekami – ucierpiały jedynie od fali uderzeniowej. W rejonie przylegającym bezpośrednio do miejsca wybuchu spopieliała ziemia pokryta była cienką zeszkloną warstwą roztopionego piasku, która trzeszczała i łamała się pod nogami, jak lód na kałuży po porannym przymrozku. Wzniesiona chmura wyniosła promieniotwórcze substancje z bomby i wyrwane z gruntu, na wysokość ponad 10 km. Po 21 minutach od wybuchu, poprzez radioaktywną chmurę przelatywały bojowe samoloty.

Z niezależnych źródeł wiadomo, iż wielu żołnierzy wkrótce po tym zmarło.

Opisane fakty są oparte na relacji świadków. Przytaczamy je, by z jednej strony pokazać skutki działania broni atomowej na polu bitwy, z drugiej zaś – stan przygotowań do wojny jądrowej w owym czasie.

Drugie ćwiczenia z użyciem broni jądrowej Związek Sowiecki przeprowadził 10 września 1956 r. na poligonie Semipałatyńskim; Stany Zjednoczone zorganizowały osiem podobnych ćwiczeń.

BIBLIOGRAFIA

Do Przedmowy

1. Proliferation news and resources, <<http://www.ceip.org/files/nonprolif/Numbers/default.asp>>
2. Ioryś A.I., Morochow I.D., Iwanow I.D.: A–bomba, Akademia Nauk ZSRR, wyd., „Nauka”, Moskwa, 1980.
3. Wywiad A. Einsteina: Kaizo Publishing Company, sept.20.1952, <<http://www.amnh.org/exhibitions/einstein/peace/popups/tohara.php#>>
4. Kowalska M.: Bomby radiologiczne nie takie groźne, Postępy Tech. Jądr., nr 45/4, 2002, s. 50–53.

Do rozdziałów 1, 2, 3, 4

1. Rougeron Camille: Les applications de l’explosion thermonucleaire, Paris, 1956.
2. Choppin G.R., Rydberg J.: Nuclear Chemistry – Theory and Applications, Pergamon Press, 1981.
3. Ursu Ioan: Fizica si tehnologia materialelor nucleare, București, 1982
4. Kubowski Jerzy: Fizyczno – techniczne aspekty wybuchów jądrowych, Postępy Techniki Jądrowej, vol.42 z.2 1999, s.37–43.
5. Справочник по ядерной энерготехнологии, Москва, Энергоиздат, 1989 г.
6. Gsponer André, Hurni Jean-Pierre: Forth Generation Nuclear Weapons, Independent Scientific Research Institute, Technical Report INESAP, Geneva, Seventh edition, Sep. 2001.
7. Carson Mark: Reactor Grade Plutonium’s Explosive Properties, Nuclear Control Institute, Aug. 1990, <<http://www.nci.org/NEW/NT/rgpu-mark-90.pdf>>
8. Sublette Carey: Introduction to Nuclear Weapon Physics and Design (Version 2.15, Feb.1999), <<http://nuketesting.enviroweb.org/hew/Nwfaq/Nfaq2.html#nfaq2.1>>
9. Richard K.Brown: Nuclear Weapons Diagrams, 1 May 1995, <<http://nuketesting.enviroweb.org/hew/Library/Brown>>
10. Nuclear U.S. Weapons and History: <<http://nuketesting.enviroweb.org/hew/Usa/Med/index.html>>
11. The National Atomic Museum, <www.atomicmuseum.com>
12. Terrorists may know how to make nukes from low – grade uranium, February 28 2003; <<http://www.smh.com.au/articles/2003/02/27/1046064168998.html>>
13. Eisler Peter: Fuel for nuclear weapons is more widely available, USA TODAY – 27 Feb. 2003, <http://story.news.yahoo.com/news?tmpl=story2&cid=676&ncid=716&e=20&u=/usatoday/20030227/ts_usa_today/4902623>

Do rozdziału 5

1. Carey Sublette: Are Suitcase Bombs Possible ?, 18 May 2002, <<http://nuketesting.enviroweb.org/hew/News/DoSuitcaseNukesExist.html>>
2. The U.S. Nuclear Weapons Cost Study Project, <<http://www.brook.edu/dybdocroot/FP/projects/nucwcost/gadget.htm>> <<http://www.brook.edu/fp/projects/nucwcost/weapons.htm>> <<http://www.brook.edu/dybdocroot/FP/projects/nucwcost/155mm.htm>>
3. Бомба в чемодане, Национальная служба новостей: <<http://www.nns.ru/interv/arch/1999/09/07/int349.html>>
4. Атомное ручное оружие: <<http://supergun.webzone.ru/menu.htm>>
5. Congressional Hearings, October 2, 1997: <http://www.fas.org/spp/starwars/congress/1997_h/h971002w.htm>
6. Nelson Robert W.: Low – Yield Earth – Penetrating Nuclear Weapons, Jan/Febr.,2001, vol.54, N.1, <<http://fas.org/faspir/2001/v54n1/weapons.htm>>
7. DeMone Paul: <<http://yarchive.net/nuke/micronuke.html>>

Do rozdziału 6

1. Лебедев Валерий: Как Никита показал Америке кузькину мать, 09.11.1997. <<http://www.Lebed.com/art292.htm>>
2. Гончаров А.: Основные события истории создания водородной бомбы в СССР и США, Успехи физических наук, Т. 166, н.10, окт.1996, с. 1095–1096.
3. Hansen Chuck: A Hindenburg in the Bomb Bay – The Transition from Liquid to Solid Fueled Thermonuclear Weapons, 1951–1954; July 15, 2001, p.13, <www.us.coldwar.com>
4. The Hydrogen Bomb 1950–1956:

- <<http://www.aip.org/history/sakharov/hbomb.htm>>
5. The High Energy Weapons Archiv: <<http://nuketesting.enviroweb.org/hew/Russia/Sakdraw.html>>
 6. Operation Ivy: <<http://nuketesting.enviroweb.org/hew/Usa/Tests/Ivy.html>>
 7. Ulam Stanislaw, the Hydrogen Bomb and Nuclear Saucers:
<<http://www.ufx.org/gfb/tellerulam.htm>>
 8. Fuchs Klaus, (1911–1988)
<<http://www.pbs.org/wgbh/amex/bomb/peopleevents/pandeAMEX54.html>>
 9. Sacharow Andriej: Wspomnienia, Wyd. Pomost, 1991.
 10. РДС – 1: <<http://himvoiska.narod.ru/first1.html>>
 11. Голованов Ярослав: Юлий Борисович Харитон,
<<http://www.peoples.ru/science/physics/khariton/>>
 12. Rekomendacja A. Einsteina dot. zwolnienia K. Fuchsa z obozu internowanych: „Washington Post”, 2.10.1950 r.

Do rozdziału 7

1. Scoville Herbert Jr.: Neutron Bomb’s Illusions, International Herald Tribune, Sep. 7, 1981.
2. Sonoluminescence, an Introduction:
<http://www-physics.lnl.gov/N_Div/sonolum/>
3. Sonoluminescence energy: <<http://library.thinkquest.org/26366/text/alternatives/sl.html>>
4. Sound waves size up sonoluminescence: Feb. 5, 2002,
<<http://www.physicsweb.org/article/news/6/2/3>>
5. Enhanced Radiation Weapons: Federation of American Scientists,
<<http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/design.htm>>
6. The Neutron Bomb: <<http://www.nuclearfiles.org/articles/2002/020109neutronbomb.htm>>

Do rozdziału 8

1. Teller Edward, Interview, Sep. 30, 1990, <<http://www.achievement.org/autodoc/page/tel0int-1>>
2. Mycielski J.: Jan Stanisław Marcin Ulam (1904 – 1984), Wiad. Mat. 29 (1) 1990, s. 21 – 37.
3. Notes of the Interim Committee Meeting, Thursday. 31 May 1945, <http://www.whistlestop.org/>
4. O’Connor J.J., Robertson E.F.: Stanislaw Marcin Ulam,
<<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Ulam.html>>
5. Decision and Opinions of the United States Atomic Commission in the Matter of Dr. Robert Oppenheimer, Yale Law School,
<<http://www.yale.edu/lawweb/avalon/abomb/opp06.htm>>
6. Ulam Stanislaw M.: <http://www.pbs.org/wgbh/amex/bomb/peopleevents/pandeAMEX74.html>
7. President John F. Kennedy shaking hands with Stan Ulam:
<<http://www.lanl.gov/worldview/welcome/history.shtml>>
8. Gian – Carlo Rota: <<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Rota.html>>
9. General Advisory Committee’s Majority Reports on Building the H–Bomb:
<<http://www.atomicarchive.com/Docs/GACReport.shtml>>
10. Горелик Геннадий: Две параллели между тремя перпендикулярами: Андрей Сахаров, Роберт Оппенгеймер, Эдвард Теллер: <http://znanie-sila.ru/online/issue_1419.html>
11. Robert J. Oppenheimer, (1904–1967):
<<http://www.pbs.org/wgbh/amex/bomb/peopleevents/pandeAMEX65.html>>
12. Robert J. Oppenheimer biography,
<http://www.nuclearfiles.org/bios/k_o/oppenheimerjulius.html>
13. Testimony in the Matter of J. Robert Oppenheimer by General Leslie R. Groves:
<<http://www.nuclearfiles.org/docs/1954/54-opp-testimony.html>>
14. Recommendations on the Immediate Use of Nuclear Weapons (June 16, 1945):
<<http://nuclearfiles.org/redocuments/1945/450616-ic-sc-panelprint.htm>>

Do rozdziału 9

1. Comprehensive Nuclear – Test – Ban Treaty: <<http://www.ctbto.org/>>
2. Кудрик Игорь, Нилсен Томас: Россия провела три подкритических ядерных взрыва, 08/092000,
<<http://www.bellona.no/ru/international/russia/nuke-weapons/nuke-test/17814.html>>
3. „Czwarta generacja broni jądrowej”, opr. J. Kubowski, (skrót raportu, André Gsponer, Jean: Pierre Hurni: „Forth Generation Nuclear Weapons”), Postępy Techniki Jądrowej, nr. 45/4, 40– 49, 2002.

4. Researchers „look inside” antimatter, Science/Nature, 30 oct., 2002
<<http://www.bbc.co.uk/cgi-bin/search/results.pl?q=antimatter&uri=%2Fa-z%2Findex.shtml&go.x=13&go.y=15>>

Do rozdziału 10

1. Glasstone S.: Skutki działania broni jądrowej, Ośrodek Informacji o Energii Jądrowej, Warszawa, 1964.
2. Ядерное оружие и его поражающие факторы:
<<http://www.nuclear-weapon.narod.ru/index.html>>
3. Nuclear Weapons Effects: ><<http://www.disastershelters.net/weapons.html>>
4. Samuel Glasstone, Philip J. Dolan: The Effects of Nuclear Weapons, US. Dep. Of Defense, 1977,
<<http://nuketesting.enviroweb.org/nukeeffect/enw77.htm>>
5. Точное общевойсковое учение с применением атомного оружия,
<http://www.iicas.org/articles/libr_rus_9_12_99_dog.htm>
6. PDF Differentiation and Defense: An Agenda for. .<<http://www.nuclearfiles.org/>>
7. American School of Defense–ASOD: <<http://www.asod.org/>>