

ŹRÓDŁA ENERGII

Podstawowym źródłem energii znajdujących się do tej pory w użyciu napędów lotniczych jest energia chemiczna paliw naturalnych lub syntetycznych.

Dopiero od niewielu lat rozpoczęto prace nad zastosowaniem do tego celu energii jądrowej. Pomyślne zrealizowanie tych zamierzeń rozszerzy nasze dotychczasowe możliwości przede wszystkim w dwu kierunkach:

po pierwsze — zabezpieczy przed wyczerpaniem się dysponowanych przez nas źródeł energii,

po drugie — umożliwi konstruowanie jednostek napędowych o większej niż dotychczas mocy i o nieograniczonym praktycznie zasięgu.

Należy jednak sądzić, że ze względu na duże koszty energia jądrowa będzie wykorzystywana w komunikacji, do czasu wyeksploatowania paliw chemicznych, jedynie w wyjątkowych, technicznie uzasadnionych przypadkach.

Źródłem energii chemicznej jest proces spalania polegający na łączeniu się w odpowiednich warunkach dwu nie będących w równowadze chemicznej materiałów. Najczęściej jednym z tych materiałów jest tlen, a zachodzący proces egzotermiczny jest reakcją utleniania. Tlen w postaci czystej stosuje się rzadko. W silnikach przelotowych występuje on jako składnik powietrza, w silnikach rakietowych natomiast jako składnik innego, przeważnie syntetycznego utleniacza. Materiał ulegający utlenianiu nazywa się paliwem. Paliwo i utleniacz razem tworzą materiał pędny. W zależności od stanu skupienia rozróżnia się materiały pędne stałe, ciekłe i gazowe. Tak samo oczywiście stałe, ciekłe i gazowe mogą być paliwa i utleniacze. Paliw gazowych używa się ze względu na ich mały ciężar właściwy tylko w wyjątkowych przypadkach.

4.1. MATERIAŁY PĘDNE

Materiały pędne stanowią dziedzinę najbardziej różniącą silniki omawiane w tej książce. W silnikach pulsacyjnych i strumieniowych utleniaczem jest powietrze atmosferyczne, paliwem na-

tomiast benzyna, nafta lub olej gazowy, przy czym w silnikach pulsacyjnych stosuje się głównie benzynę. W silnikach rakietowych na stały materiał pędny paliwo i utleniacz tworzą mieszaninę gotową do bezpośredniego spalania bez wstępnych zabiegów. W silnikach rakietowych na ciekły materiał pędny utleniacz i paliwo znajdują się w niezależnych zbiornikach i muszą być do procesu spalania odpowiednio przygotowane. W obu przypadkach rakietowych materiałów pędnych zarówno utleniacz, jak i paliwo są produkowane sztucznie lub w najlepszym razie przetwarzane z surowca naturalnego.

✓ 4.1.1. Własności energetyczne materiałów pędnych

Z zależności na prędkość wypływu z dyszy silnika [3.11]

$$w = \sqrt{\frac{2g\kappa B}{\kappa - 1}} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \sqrt{1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}} \quad [4.1]$$

wynika, że prędkość ta zależy od temperatury na początku dyszy T (równej temperaturze spalania), pozornego ciężaru molowego spalin μ , stosunku ciśnień na końcu p i początku p_0 dyszy oraz od wykładnika izentropy κ . Dlatego przy równym stopniu rozprężania p_0/p prędkość wypływu spalin powstałych ze spalania mieszanek węglowodorowo-powietrznych będzie zależeć jedynie od temperatury spalania i tym samym od wartości opałowej paliwa.

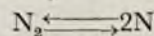
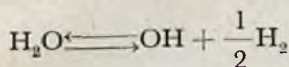
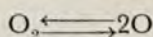
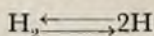
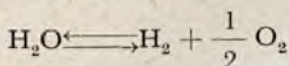
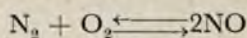
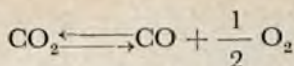
W przypadku silników rakietowych wartość opałowa jest wielkością niewystarczającą do porównywania różnych materiałów pędnych. Za najbardziej obiektywne kryterium przyjmuje się wtedy prędkość wypływu lub przynajmniej wyrażenie mające największy wpływ na jej wielkość, a mianowicie $\sqrt{T/\mu}$.

✓ 4.1.2. Określenie składu, temperatury i pozornego ciężaru molowego spalin

W wyniku całkowitego spalania powszechnie spotykanych materiałów pędnych otrzymuje się spaliny zawierające następujące składniki: CO_2 , O_2 , H_2O , H_2 i N_2 . Procentowy udział tych składników w spalinach można określić na podstawie składu paliwa i utleniacza oraz odpowiednich równań stechiometrycznych.

Przy temperaturach rzędu 2000°K należy już w obliczeniach składu spalin uwzględnić zjawiska dysocjacji.

W tym przypadku jakość produktów spalania określają następujące równania równowagi.



Oznaczając ciśnienia cząstkowe poszczególnych składników spalin przez p z odpowiednim wskaźnikiem (np. ciśnienie cząstkowe tlenu przez p_{O_2}) można wyznaczyć stałe równowagi odpowiadające siedmiu podanym wyżej równaniom równowagi:

$$K_1 = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{CO}_2}}; \quad K_2 = \frac{p_{\text{H}_2} \cdot p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}; \quad K_3 = \frac{p_{\text{OH}} p_{\text{H}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}};$$

$$K_4 = \frac{p_{\text{NO}}^2}{p_{\text{N}_2} p_{\text{O}_2}}; \quad K_5 = \frac{p_{\text{H}}^2}{p_{\text{H}_2}}; \quad K_6 = \frac{p_{\text{O}}^2}{p_{\text{O}_2}}; \quad K_7 = \frac{p_{\text{N}}^2}{p_{\text{N}_2}}$$

Powyższy układ równań może być uzupełniony przez następujące równania bilansu masy entalpii i ciśnienia

$$C_m = \frac{12}{\sum \mu_i p_i} (p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}})$$

$$H_m = \frac{1}{\sum \mu_i p_i} (2p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{H}_2} + p_{\text{OH}} + p_{\text{H}})$$

$$N_m = \frac{14}{\sum \mu_i p_i} (2p_{\text{N}_2} + p_{\text{NO}} + p_{\text{N}})$$

$$O_m = \frac{16}{\sum \mu_i p_i} (2p_{\text{O}_2} + 2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}} + p_{\text{O}})$$

$$i_{cm} = [i_{cs}]_{T_s}$$

$$\mu = \frac{\sum \mu_i p_i}{p}$$

$$P = \sum p_i$$

gdzie: C_m, H_m, N_m, O_m — udziały ciężarowe składowych pierwiastków materiału pędnego,

μ_i — ciężar molowy danego składnika,

i_{cm} — entalpia całkowita materiału pędnego,

$[i_{cs}]_{T_s}$ — entalpia spalin w temperaturze spalania,

p_i — ciśnienie cząstkowe danego składnika.

Entalpię całkowitą materiału pędnego wyznacza się, w zależności

$$i_{cm} = \frac{i_{cu} + f i_p}{1 + f} \text{ [kcal/kg]} \quad [4.2]$$

gdzie: i_{cu} — entalpia całkowita utleniacza,
 i_p — entalpia całkowita paliwa,
 f — stosunek wydatków paliwa i utleniacza.

Entalpia całkowita jest sumą entalpii termodynamicznej oraz energii chemicznej. Głównym składnikiem energii chemicznej jest ciepło tworzenia, czyli ciepło, które należy dodać lub odjąć, aby z prostych elementów chemicznych powstał związek. Jeśli ciepło tworzenia związku odnosi się do tego stanu skupienia, w którym dana substancja znajduje zastosowanie w silniku, wówczas przy obliczaniu energii chemicznej należy uwzględnić ciepło przejścia z jednego stanu skupienia w drugi (a więc np. ciepło sublimacji, parowania, rozpuszczania itd.). Różnica entalpii całkowitych mieszaniny palnej i produktów spalania określonych w tej samej temperaturze nazywa się wartością opałową. Wartość opałowa odnosi się do jednostki ciężaru paliwa lub jednostki ciężaru materiału pędnego.

Entalpię całkowitą spalin określa się z zależności

$$(i_{cs})_{T_s} = \sum M_i i_{ci} = 1000 \frac{\sum i_{ci} p_i}{\mu_i p_i} \text{ [kcal/kg]} \quad [4.3]$$

gdzie: M_i — liczba moli i — tego gazu zawartego w 1 kG spalin,
 i_{ci} — entalpia całkowita i — tego gazu w temperaturze T_s .

W podanym układzie 14 równań występuje 14 niewiadomych, a mianowicie: 11 ciśnień cząstkowych gazów (stanowiących mieszaninę), pozorny ciężar molowy mieszaniny μ , ciśnienie p i temperatura T_s .

Istnieje szereg metod rozwiązania tego układu równań.

Jedna z nich, którą najlepiej się posługiwać, gdy mamy do dyspozycji elektryczną maszynę do liczenia, polega na przekształceniu wszystkich równań równowagowych w postać logarytmiczną. Wtedy stają się one prostymi równaniami liniowymi, odpowiednimi do obliczeń maszynowych. Potrzebne do konkretnych rozwiązań dane zebrano w tabelach 4.2, 4.7, 4.8 oraz załącznikach 1 i 2, znajdujących się na końcu książki.

4.1.3. Określenie średniego wykładnika izentropy spalin

Wykładnik izentropy spalin o określonym składzie zależy praktycznie jedynie od temperatury. Ponieważ temperatura zmienia się w czasie rozprężania, należy więc określić średni

wykładnik izentropy ważny dla danego procesu. Parametry termodynamiczne na końcu i początku dyszy są związane równaniem izentropy

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

gdzie: T i p — temperatura i ciśnienie na początku dyszy,
 T_0 i p_0 — temperatura i ciśnienie na końcu dyszy.

Jeśli założyć, że skład spalin podczas rozprężania nie ulega zmianie (to znaczy, że nie zachodzi proces redysocjacji), wtedy można przyjąć następujące związki do określenia średniego wykładnika izentropy:

$$\kappa = \frac{\bar{c}_p}{c_p - AR}$$

$$\bar{c}_p = \frac{i - i_0}{T - T_0}$$

$$R = \frac{848}{\mu}$$

gdzie: κ — wykładnik izentropy,

\bar{c}_p — średnie ciepło właściwe spalin przy stałym ciśnieniu,

A — równoważnik cieplny pracy mechanicznej,

R — stała gazowa spalin,

μ — pozorny ciężar molowy spalin,

i oraz i_0 — entalpia termodynamiczna spalin na początku i końcu dyszy.

✓ 4.1.4. Własności kinetyczne materiałów pędnych

Własności kinetyczne materiałów pędnych wpływają na czas potrzebny do wyzwolenia energii zawartej w tym materiale. Rozróżnia się dwa zakresy operacyjne, w których analizie należy uwzględniać własności kinetyczne. Są to:

— rozruch,

— praca ustalona.

W obu przypadkach duży wpływ na jakość procesów ma opóźnienie zapłonu. Opóźnieniem zapłonu nazywa się przedział czasu, który dzieli zetknięcie aktywnych składników od ich zapalenia się (jest to całkowite opóźnienie zapłonu τ_c). Proces zapłonu następuje po powstaniu odpowiednio sprzyjających warunków, to jest przede wszystkim po odparowaniu, wymieszaniu się par

i podgrzaniu ich do odpowiedniej temperatury, zwanej temperaturą zapłonu. Dopiero wtedy między cząstkami utleniacza i paliwa zachodzą wstępne reakcje chemiczne, które prowadzą do reakcji płomieniowych. Stąd wynika podział całkowitego opóźnienia zapłonu na opóźnienie fizyczne τ_f i opóźnienie chemiczne τ_{ch} . Oczywiście

$$\tau_c = \tau_f + \tau_{ch}$$

Chemiczne opóźnienie zapłonu zależy od termodynamicznych parametrów mieszanki, a mianowicie

$$\tau_{ch} \sim e^{\frac{1,987 E}{T}} ; \quad \tau_{ch} \sim p^{-n}$$

gdzie: p — ciśnienie mieszanki,

T — jej temperatura,

E — energia aktywacji,

n — stała.

Z zależności tych wynika, że chemiczne opóźnienie zapłonu maleje, gdy ciśnienie i temperatura mieszanki rosną. Opóźnienie zapłonu w silnikach rakietowych na paliwo ciekłe decyduje o prawidłowym przebiegu rozruchu tych silników. Zbyt wielkie opóźnienie zapłonu powoduje nagromadzenie się w komorze spalania dużej ilości materiału pędnego, który eksplodując może zniszczyć silnik. Opóźnienie zapłonu wpływa poza tym we wszystkich silnikach na wielkość komór spalania. Ze wzrostem opóźnienia zapłonu komora ma oczywiście większą długość.

4.1.5. Własności eksploatacyjne materiałów pędnych

Eksploatacyjne własności materiałów pędnych wynikają z warunków pracy silnika oraz okoliczności ich użytkowania. Materiały pędne ze względów użytkowych powinny być mało toksyczne, a ich aktywność korodująca powinna być jak najmniejsza. Z tych względów np. węglowodory muszą być pozbawione sodu i siarki, a używany jako utleniacz w silnikach rakietowych kwas azotowy powinien zawierać dodatki (np. roztwory ciężkich kwasów organicznych) zmniejszające jego aktywność. Trwałość chemiczna materiału pędnego powinna być ze względu na składowanie możliwie duża. Powinien być on też niewrażliwy na nagłe zmiany temperatury oraz uderzenia.

Materiały pędne nie mogą pozostawiać osadów w przewodach doprowadzających ani też nagaru w komorze spalania. W silnikach rakietowych na ciekły materiał pędny utleniacz lub paliwo stosuje się do chłodzenia silnika. Z tego powodu powinny one wtedy mieć duże ciepło właściwe, duże ciepło parowania i powinny być odporne na rozkład w podwyższonej temperaturze.

W celu zmniejszenia oporów hydromechanicznych przy zasilaniu materiały pędne powinny odznaczać się małą lepkością. Żeby zachować podczas pracy stały stosunek utleniacza i paliwa, należy tak dobierać oba te składniki, aby ich lepkości zmieniały się podobnie wraz ze zmianą temperatury. Od stałych materiałów pędnych wymaga się poza tym łatwości formowania ładunków dowolnego kształtu i wielkości. Ze względów wojskowych żąda się też niekiedy, aby powstałe ze spalania gazy były bezdymne i nieświejące. Ten postulat nie należy do najważniejszych i nie zawsze jest spełniony.

Ostatnimi wymaganiami są: niska cena i możliwie naturalne pochodzenie materiału pędnego.

4.1.6. Stałe materiały pędne

Stałe materiały pędne dzielą się stosownie do składu i struktury fizycznej na dwie kategorie: materiałów jednorodnych i niejednorodnych. Podstawowymi składnikami materiałów jednorodnych są tworzące koloidalną mieszaninę estry kwasu azotowego: nitrogliceryna i nitroceluloza.

Skład ten wywodzi się od stosowanego już od wielu lat w artylerii prochu bezdymnego. Oprócz wymienionych składników jednorodny materiał stały zawiera niewielkie ilości innych substancji. Do nich należą stabilizatory, stosowane w celu zmniejszenia szybkości rozkładu w czasie przechowywania, flegmatyzatory, zmniejszające prędkość palenia oraz substancje, stosowane do obniżenia temperatury spalania, zwiększania plastyczności i wytrzymałości ziaren.

Jednorodne materiały pędne ze względu na szereg wad są obecnie wypierane przez materiały niejednorodne. Do wad tych należą: mała trwałość, silna zależność prędkości spalania od ciśnienia, znaczny koszt półproduktów oraz skomplikowany i niebezpieczny wyrób.

Wady te w mniejszym stopniu występują w niejednorodnych materiałach pędnych. Materiały niejednorodne mają różny skład. Ich cechą wspólną jest powstawanie na drodze rozprzeczania cząstek dobrze rozdrobnionej substancji utleniającej w podłożu żywicowym, elastomerowym lub z masy plastycznej.

Struktura tych materiałów jest wyraźnie niejednorodna z lokalnymi obszarami bogatymi lub ubogimi w tlen. Powszechnie spotykanymi utleniaczami w niejednorodnych materiałach pędnych są azotany i nadchlorany.

Najbardziej perspektywicznym z tych związków wydaje się nadchloran litu zawierający około 60% tlenu. Dwa przykładowe składy stałych materiałów pędnych podaje tabela 4.1.

Własności stałych materiałów pędnych

Rodzaj	Skład [%]	Ciepota właściwy [G/cm ³]	Impuls właściwy I_w [sek]	Temperatura spalania T_s [°K]	Wydajnik potęgowy η Równ. [6.17]	Ciepota molowy [kJ/mol]	Wydajnik izentropowy	
Jednorodny pra- sowany (J.P.N.)	Nitroceluloza	51,50	1,62	220	3125	0,69	26,4	1,215
	Nitrogliceryna	43,00						
	Dwutyloftalan	3,25						
	Centralit	1,00						
	Siarczan potasu	1,25						
	Sadza	0,20						
	Wosk	0,08						
Niejed- norodny	NH ₄ ClO ₄	80	1,72	236	2790	0,4	25,4	1,22
	Lepiszczce organiczne li- czone jako C ₂ H ₄ O ...	20						

Rozwój stałych materiałów pędnych zmierza w kierunku poszukiwania wydajniejszych utleniaczy (np. ozonków) oraz podwyższenia wartości opałowej materiałów przez domieszanie wysokokalorycznych metali i boru. Dodatki te podwyższają wprawdzie efekt cieplny spalania paliwa, zwiększają jednak równocześnie pozorny ciężar molowy spalin. Dlatego istnieje pewien optymalny procent tych dodatków, powyżej którego dalsze zwiększenie ich zawartości już się nie opłaca.

• 4.1.7. Paliwa

Węglowodory. Większość obecnie używanych paliw węglowodorowych pochodzi z ropy naftowej. Istotnymi składnikami ropy są trzy grupy węglowodorowe: parafiny, nafteny oraz związki aromatyczne. Ich wzajemny stosunek zależy od pochodzenia ropy. Przeróbka ropy naftowej polega na destylacji frakcyjnej i rafinacji przy działaniu kwasem siarkowym, ługiem sodowym lub ciekłym bezwodnikiem siarkowym oraz na oddzielaniu parafiny. Podczas destylacji otrzymuje się: do temperatury 150°C — benzynę, od 150 do 300°C — naftę, od 300 do 350°C — olej gazowy, powyżej 350°C — inne oleje (używane do smarowania, a nie jako paliwo).

Węglowodory są paliwami stosowanymi we wszystkich rodzajach silników spalinowych. Silniki pulsacyjne zasila się benzyną, silniki strumieniowe przeważnie naftą, silniki rakietowe naftą lub olejem gazowym. Własności paliw węglowodorowych zebrano w tabeli 4.2.

Własności paliw węglowodorowych

Jednostki	Ciężar molowy —	Ciężar właściwy [kg/l]	Wartość opałowa [kcal/kg]	Zapotrzb. powietrza [kg/kg]	S k ł a d			
					C	H ₂	O ₂ +N ₂	S
Benzyna	140	0,74	10370	15,03	0,84	0,16	—	—
Nafta	140	0,8 ÷ 0,81	10300	14,8	0,85	0,141	0,006	0,003
Olej gazowy	140	0,86	10000	14,3	0,865	0,13	0,001	0,004

Paliwa węglowodorowe przechowuje się w zbiornikach metalowych. Nie działają one szkodliwie na materiał naczynia, a właściwe środki ostrożności należy zachowywać w związku z ich dużą lotnością i niską temperaturą zapłonu. Na organizm ludzki wywierają one szkodliwe działanie dopiero przy stosunkowo dużych stężeniach w powietrzu, przy czym najbardziej toksyczne są węglowodory aromatyczne.

Ciekły wodór. Ciekły wodór jest paliwem niezwykle atrakcyjnym ze względu na wysoką wartość opałową, a co za tym idzie, i wysoki impuls właściwy. Obecnie znalazł on już zastosowanie do napędu silników rakietowych oraz strumieniowych, przewidzianych do pracy przy dużych liczbach Macha. Własności wodoru jako pierwiastka i jako paliwa są zebrane w tabelach 4.3 i 4.4.

Przeprowadzenie wodoru w stan ciekły jest zagadnieniem bardzo trudnym ze względu na jego niską temperaturę krytyczną. Obecnie stosuje się dwie metody otrzymywania wodoru ciekłego:

— wysokociśnieniowa, polegająca na oziębianiu wodoru sprężonego do 140 ata ciekłym powietrzem lub azotem i następnym jego rozprężaniu;

— niskociśnieniowa z chłodzeniem za pomocą helu.

Tabela 4.3

Własności ciekłego wodoru

Temperatura wrzenia (przy 710 mm Hg)	Temperatura krytyczna	Ciśnienie krytyczne	Ciężar właściwy	Ciepło parowania
[°C]	[°C]	[kg/cm ²]	[kg/m ³]	[kcal/kg]
-253	-229	13,5	70,9	108

Materiały pędne z wodorem jako paliwem

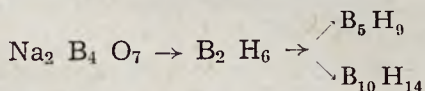
Materiał pędny	Stosunek utleniacza do paliwa	Temperatura spalania [°C]	Impuls właściwy [sek]
Wodór — tlen	2,89	2141	345
Wodór — fluor	9,42	4466	371
Wodór — ozon	2,65	2360	373

W metodzie tej krążący w aparaturze gazowy hel oziębia się sposobem odpowiednio dobranych przemian termodynamicznych do temperatury niższej od temperatury wrzenia wodoru (-253°C). Pozwala to na skroplenie wodoru znajdującego się pod nieznacznym ciśnieniem.

Poważne trudności występują nie tylko przy otrzymywaniu ciekłego wodoru, ale również i przy jego przechowywaniu. Pojemniki do przechowywania ciekłego wodoru wykonuje się z nierdzewnej stali stopowej o dużej zawartości niklu, która jest odporna na działanie niskich temperatur (wywołujących kruchość materiałów). Pojemniki te mają ścianki wielowarstwowe. Przestrzenie między poszczególnymi warstwami ścianek są wypełnione materiałem izolacyjnym, przy czym całość pojemnika jest chłodzona ciekłym azotem lub helem.

Borowodory. Borowodory zwane inaczej boranami mają średnio o $40 \div 60\%$ wyższe ciepło spalania od odpowiednich związków węgla z wodorem — węglowodorów.

Surowcem do produkcji paliw boranowych jest boraks. Przykładowy proces otrzymywania borowodorów przedstawia poniższy schemat reakcji:



Proces ten składa się z dwu etapów:

— otrzymywanie dekaboranu (dwuborosześciowodoru) z boraksu,

— przeprowadzenie go w pentaboran (pięcioborodzieściowodór) lub dekaboran (dziesięcioborocztelnastowodór).

W dalszym ciągu otrzymane produkty mogą być alkirowane (łączone z alkilami, czyli rodnikami wywodzącymi się z węglowodorów alifatycznych przez odjęcie jednego atomu wodoru. np. metyl — CH_3 od metanu CH_4 , etyl C_2H_5 od etanu C_2H_6) lub

wiązane z metalami, takimi jak aluminium, sól, lit i beryl w postaci metaloborowodorów. W tabeli 4.5 zebrano własności kilku przykładowych paliw boranowych.

Tabela 4.5

Własności paliw boranowych

Nazwa	Wzór	Ciepłota właściwa [kJ/dm ³]	Temper. krzepnie- cia [°C]	Tempe- ratura wrzenia [°C]	Ciepło spalania [kJ/kg]
1. Borowodory					
Dwuboran . . .	B ₂ H ₆	0,43	-166	- 93	17750
Pentaboran	B ₅ H ₉	0,61	- 47	48	16650
Dekaboran	B ₁₀ H ₁₄	0,94	99	213	15550
2. Alkiloborowodory					
Metyldwuboran. . .	CH ₃ B ₂ H ₅	—	—	—	14400
Etyldwuboran . . .	C ₂ H ₅ B ₂ H ₅	—	—	—	13900
3. Metaloborowodory					
Borowodorek bery- lowy	Be(BH ₄) ₂	—	123	91,3	—
Borowodorek glinowy.	Al(BH ₄) ₃	—	-65,4	44,5	—

Paliwa boranowe nie są obecnie eksploatowane na większą skalę. Koszt ich produkcji jest jeszcze duży, ale nakłady, jakie złożone są na badania tych paliw oraz na opracowanie nowych technologii, wskazują, że należy się liczyć z niedalekim wzrostem ich znaczenia jako paliw technicznie użytecznych.

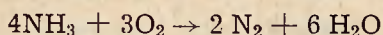
Alkohole. Alkohole mają znacznie mniejszą wartość opałową niż węglowodory, dają też nieco niższą temperaturę spalania. Ich impuls właściwy niewiele się jednak różni od impulsu właściwego paliw węglowodorowych (wynika to z podobnego stosunku T/u).

Jako paliwa rakietowe alkohole zawdzięczają swoje dosyć duże zastosowanie przede wszystkim łatwym metodom produkcji.

Najczęściej stosowanymi alkoholami są: metylowy, etylowy i furfurylowy. Ten ostatni stosuje się przeważnie w mieszkankach samozapłonowych z kwasem azotowym jako utleniaczem.

Związki azotowe. Związki azotowe są dość często stosowane jako paliwa raketowe. Grupę tę reprezentują przede wszystkim: amoniak i wodzian hydrazyny.

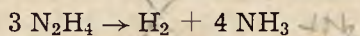
Spalając się w tlenie wg reakcji



daje amoniak wysokie temperatury spalania oraz dużo produktów gazowych. Własności toksyczne, korozyjne oraz wysoka prężność par utrudniają jego szersze stosowanie.

Wodzian hydrazyny $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ jest azeotropową mieszaniną, która wrze w temperaturze $120,3^\circ\text{C}$ i zawiera ciężarowo 68,5% hydrazyny. Hydrazynę o większych stężeniach uzyskuje się przez destylację ekstrakcyjną.

Z chemicznego punktu widzenia hydrazyna jest środkiem silnie redukującym i słabą zasadą. W nieobecności utleniaczy pod wpływem temperatury hydrazyna rozkłada się wg równania:



W temperaturze pokojowej rozkład ten zachodzi z szybkością 0,01% na godzinę, w temperaturze 250°C zaś 10% na minutę.

Hydrazyna jest związkiem silnie trującym. Przechowuje się ją w naczyniach ze stali nierdzewnej lub aluminium, przy czym ze względu na możliwość wybuchu przestrzeń nad cieczą zapełnia się gazem obojętnym, a naczynie przechowuje się w temperaturze poniżej 40°C .

Metale. Dodatek metali do ciekłych lub stałych materiałów pędnych w postaci roztworów koloidalnych lub zawiesin w żelach paliwa znacznie zwiększa ich efekt cieplny, szczególnie w odniesieniu do jednostki objętości. W wyniku spalania metali w tlenie powstają tlenki, które w normalnych temperaturach są ciałami stałymi; fluor natomiast tworzy z niektórymi metalami produkty gazowe. Najczęściej spotykanymi metalowymi dodatkami do paliw są: lit, beryl, magnez, glin i krzem.

Tabela 4.6

Wartość opałowa mieszanek nafta-kwas azotowy-beryl

Składniki mieszanki	Wartość opałowa [kcal/kg]
Nafta + kwas azotowy	1440
„ + „ „ + 3,6% berylu	1790
„ + „ „ + 7,2% berylu	2130
„ + „ „ + 10,0% berylu	2480

Wpływ dodatku berylu na wartość opałową odniesioną do 1 kG mieszanki nafty i kwasu azotowego ilustruje tabela 4.6.

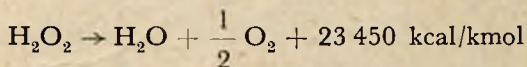
Pirofory. Pirofory są to paliwa, które w zetknięciu z powietrzem samorzutnie się zapalają. Najczęściej spotykaną postacią paliw piroforowych są związki metaloorganiczne (np. trójmetyloglin). Domeną piroforów będą w przyszłości hiperdźwiękowe silniki strumieniowe.

4.1.8. Rakietowe ciekłe materiały pędne

Rakietowe ciekłe materiały pędne (nazywane też często propergolami) dzielą się w zależności od składu na jednoskładnikowe i dwuskładnikowe.

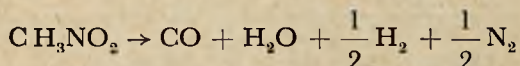
W propergolach jednoskładnikowych wydzielono z kolei dwie grupy: katergoli i monergoli.

Katergole są to propergole, które dostarczają ciepła podczas rozkładu. Typowym przykładem katergolu jest nadtlenek wodoru rozkładający się w obecności nadmanganianu wapnia na przegrzaną parę wodną i tlen



80% nadtlenek wodoru wytwarza mieszaninę gazów o temperaturze 470°C. Ponieważ w tym przypadku nie zachodzi spalanie, reakcję powyższą nazywa się „zimną”, w przeciwieństwie do „gorącej” reakcji spalania w nadtlenku wodoru, np. nafty.

Monergole są to propergole jednoskładnikowe, zawarta w nich ciecz jest mieszaniną związków, z których jedno spełnia rolę utleniacza, a drugie paliwa. Możliwe są również monergole składające się z jednego tylko związku, które dostarczają energii podczas utleniania wewnątrzcząsteczkowego. Przykładem takiego monergolu jest nitrometan, ulegający wewnętrznemu spalaniu pod działaniem ciśnienia 40 ata. Reakcja ta zachodzi wg następującego równania.



Propergole dwuskładnikowe dzielą się na propergole samozapłonowe, zwane hipergolami, i propergole normalne niesamozapłonowe.

W propergolach dwuskładnikowych paliwo i utleniacz znajdują się w niezależnych zbiornikach i są do komory doprowadzone niezależnie. W hipergolach zapłon następuje samorzutnie po zetknięciu się w komorze spalania strumieni paliwa i utleniacza.

Własności ciekłych dwuskład

Założenia: spalanie adiabatyczne, rozprężanie izentropowe, ciśnienie w

U t l e n i a c z	P a l i w o	Stosunek paliwa do utleniacza <i>f</i>
Fluor	Hydrazyna	0,500
„	Wodór	0,222
90% Nadtlenek wodoru	Hydrazyna	0,526
Kwas azotowy dymiący	Amoniak	0,465
„	Nafta	0,244
Tlen	75% alkohol etylowy	0,769
„	Nafta	0,455
„	Amoniak	0,769
„	Hydrazyna	1,429
„	Wodór	0,286
Ozon	Nafta	0,526

Ciężar właściwy materiału pędnego określa się z zależności

$$\gamma = \frac{1 + f}{\frac{1}{\gamma_u} + f \frac{1}{\gamma_p}}$$

gdzie: γ_u — ciężar właściwy utleniacza,

γ_p — ciężar właściwy paliwa.

nikowych materiałów pędnych

komorze spalania $p_e = 35,15 \text{ kG/cm}^2$, ciśnienie na końcu dyszy $p_e = 1,033 \text{ kG/cm}^2$

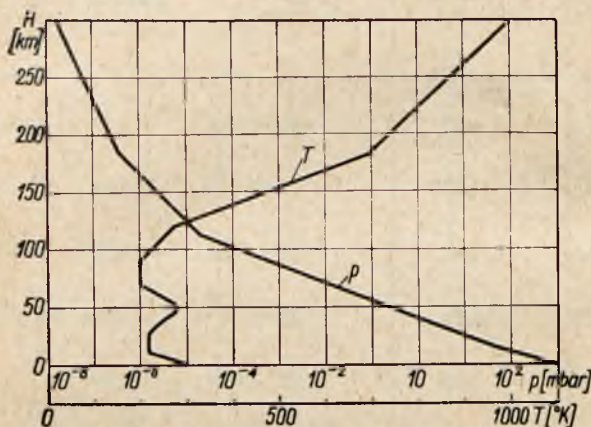
Teoretyczna temperatura spalania T_s [°K]	Wykładnik izentropy	Ciężar molowy spalin	Ciężar właściwy [kG/dcm³]	Impuls właściwy I_w [sek]
4555	1,33	19	1,3	316
3033	1,33	8,9	0,32	374
2572	1,25	18	1,2	253
2600	1,24	21	1,12	237
3116	1,23	25	1,30	238
3116	1,22	23	0,99	248
3522	1,24	22	0,98	264
2983	1,23	19	0,88	266
3072	1,25	18	1,06	282
2755	1,26	9,0	0,26	364
3800	1,25	21	1,17	283

W propeergolach normalnych komora spalania jest wyposażona w urządzenia zapłonowe (zapalnik pirotechniczny, świeca iskrowa lub początkowy wtrysk hipergolu).

W tabeli 4.7 przedstawiono szereg własności propeergoli.

• 4.1.9. Utleniacze

Powietrze atmosferyczne. Powietrze atmosferyczne jest najczęściej stosowanym środkiem utleniającym w technice. Jest ono mieszaniną tlenu i azotu przy ciężarowym udziale tlenu wynoszącym 0,231. Parametry powietrza zmieniają się wraz z wysokością, tak jak to pokazano na rys. 4.1. Jest więcej niż



Rys. 4.1. Zależność temperatury i ciśnienia powietrza atmosferycznego od wysokości

pewne, że powietrze zawsze będzie używane jako podstawowy utleniacz silników napędzających pojazdy służące do komunikacji ziemskiej, i to z dwu oczywistych przyczyn:

- po pierwsze, nie trzeba go wozić ze sobą,
- po drugie, nic nie kosztuje.

W przyszłości należy się jednak liczyć z niebezpieczeństwem zmiany składu powietrza na skutek zanieczyszczeń spalinami w takim stopniu, że może się to okazać groźne dla organizmów żywych. Sprawa jest o tyle godna uwagi, że w ciągu ostatnich 50 lat takie zmiany składu dały się już zauważyć. W latach przyszłych zmiany te będą niewątpliwie zachodzić o wiele szybciej w związku z rozwojem energetyki i komunikacji.

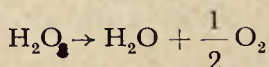
Ciekły tlen. Ciekły tlen otrzymuje się z powietrza poprzez jego skroplenie i następnie destylację. Oprócz metod przemysłowych zostały opracowane urządzenia do produkcji ciekłego tlenu w warunkach polowych, co ma szczególnie duże znaczenie przy napełnianiu zbiorników pocisków rakietowych ze względu na zmniejszenie strat związanych z transportem i przechowywa-

niem. Ciekły tlen przechowuje się w naczyniach Dewara lub innych odpowiednio izolowanych zbiornikach. Powierzchnie, z którymi styka się tlen, muszą być czyste, gdyż przy zetknięciu się ze smarami lub innymi substancjami organicznymi następuje energiczne utlenianie, co grozi wybuchem.

Ciekły tlen jest stosowany głównie jako utleniacz paliw alkoholowych lub węglowodorowych, ale nie tworzy z nimi układów samozapłonowych. W wyniku spalania w tlenie uzyskuje się bardzo wysokie temperatury spalin, tak że w niektórych przypadkach w celu jej obniżenia zachodzi konieczność rozcieńczenia paliwa wodą.

Alotropową odmianą tlenu jest ozon, którego użycie daje jeszcze wyższe efekty cieplne. Ozon otrzymuje się z tlenu, poddając go wyładowaniom elektrycznym przy napięciu $10 \div 15$ kV. Powstaje wtedy mieszanina tlenowo-ozonowa o 20% udziale ozonu. Wykorzystując różnice temperatur wrzenia ciekłego tlenu (-183°C) i ciekłego ozonu (-111°C), można uzyskać mieszaninę o większej zawartości ozonu.

Woda utleniona. Działanie utleniające nadtlenku wodoru polega na wydzielaniu tlenu, przy rozkładzie w obecności katalizatorów lub w podwyższonej temperaturze, zgodnie z reakcją:



W technice raketowej stosuje się wodę utlenioną o stężeniu od $70 \div 100\%$. Otrzymuje się ją najczęściej za pomocą metody polegającej na elektrolitycznym utlenianiu kwasu siarkowego do kwasu nadsiarkowego. W wyniku hydrolizy tej substancji powstaje 30% nadtlenek wodoru. Właściwe stężenie nadtlenku wodoru osiąga się na drodze destylacji i rektyfikacji lub przez wymrażanie. Do jego przechowywania stosuje się najczęściej naczynia szklane, porcelanowe lub aluminiowe, przy czym konieczne jest aluminium o czystości 99,5%. Podczas magazynowania następuje rozkład nadtlenku wodoru wynoszący $1 \div 2\%$ na rok. Celem zmniejszenia tego rozkładu dodaje się do wody utlenionej stabilizatorów w postaci np. kwasu fosforowego ($120 \div 150$ mg/l).

Kwas azotowy. W technice raketowej stosuje się kwas azotowy stężony $98 \div 99\%$, zawierający $0,5 \div 1,5\%$ wody oraz około $0,5\%$ tlenków azotu. W celu zwiększenia aktywności kwasu często nasycza się go dodatkowo tlenkami azotu w ilości od kilku do kilkunastu procent. Ze względu na silne działanie korozyjne kwasu azotowego używa się go często w mieszaninie z małą ilością stężonego kwasu siarkowego lub fluorowodorowego, co w pewnym stopniu obniża to działanie. Kwas azotowy

Własności fizyczne najczęściej

Czynnik	Wzór	Ciężar molekularny [kg/mol]	Punkt krzepnie- cia [°K]	Punkt wrzenia [°K]	Ciepło krzepnie- cia [kcal/mol]	Ciepło parowa- nia [kcal/mol]
Tlen	O ₂	32,0	54,39	90,19	0,106	1,630
Fluor	F ₂	38,0	55,20	85,24	0,372	1,51
Kwas azotowy	HNO ₃	63,02	231,5	359	—	7,25
Nadtlenek wo- doru	H ₂ O ₂	34,016	273,5	423,7	2,516	13,01
Ozon	O ₃	48,0	89	162,65	—	2,59
Amoniak	NH ₃	17,032	195,42	239,8	1,351	5,581
Alkohol etylowy	C ₂ H ₅ OH	46,06	158,6	351,7	1,20	9,22
Hydrazyna	N ₂ H ₄	32,05	274,7	386,7	3,025	10,2
Nafta	C ₁₀ H ₂₀	140	230	—	—	—
Wodór	H ₂	2,016	13,96	20,39	0,028	0,216

spotykanych utleniaczy i paliw

Ciężar właściwy [G/cm ³ °K]	Ciepło tworzenia [kcal/mol] (298°K)	Ciepło właściwe [kcal/kg] (°K)	Lepkość [CP] (°K)	Przewodność cieplna [°K]	Napięcie powierzchniowe [dyn/cm] (°K)
1,14(91)	0	0,4(919)	0,19(53) 0,87(90)	0,0182(95)	13,2(90)
1,64(65) 1,54(77) 1,51(85)	0	0,36(86)	0,414(69) 0,257(85)	0,0213(273) (1 ata)	17,9(69) 14,6(81)
1,52(283)	-41,40	0,422	2(269) 0,45(449)	0,236(283) 0,260(338)	42,7(284,6)
1,45(293)	-44,84	0,580	1,13(291)	0,54(320)	71,1(291)
1,57(90)	34,0	0,190	1,55(93) 4,2(432)	— —	— —
0,68(239)	-11,04	1,05(213)	0,255(239)	0,043(273)	23,4(284)
0,785(298)	-67,2	0,62(293)	1,4(293)	0,144(293)	21,5(303)
1,011(288)	12,05	0,75(300)	1,29(274) 1,12(283) 0,97(293)	0,18(293)	91,5(298)
0,8(298)	-59	0,5	1,6(288)	0,134(273) 0,100(443)	— —
0,071(20,5)	0	1,75(14) 2,33(20)	0,024(14) 0,013(20)	0,057(100)	2,31(18)

podobnie jak wodę utlenioną przechowuje się w zbiornikach aluminiowych, szklanych lub porcelanowych.

Fluor jest przykładem utleniacza beztlenowego. Reaguje on bardzo energicznie w zetknięciu z większością substancji organicznych, przy czym reakcje te mają charakter silnie egzotermiczny.

Trudność w zastosowaniu fluoru wynika z jego niskiej temperatury wrzenia (-188°C), bardzo dużej agresywności w stosunku do materiałów konstrukcyjnych oraz dużej toksyczności. Na skalę przemysłową otrzymuje się go w wyniku elektrolizy mieszaniny fluorku potasowego i fluorowodoru. Fluor przechowuje się w butlach stalowych lub niklowych.

Ze związków fluorowych obiecującym utleniaczem wydaje się trójtlenochlorek fluoru (ClO_3F). Jest to utleniacz wytwarzający wysokie impulsy właściwe. Paliwa rakietowe nie tworzą z nim układów samozapłonowych, ale są łatwo zapalne i spalają się bardzo równomiernie. Związek ten daje się łatwo przechowywać i nie ma własności korodujących ani toksycznych.

Własności fizyczne najczęściej spotykanych utleniaczy są zebrane w tabeli 4.8.

4.2. WOLNE RODNIKI

Rozważania na temat możliwości zwiększenia impulsu właściwego materiałów pędnych doprowadziły do koncepcji zastosowania wolnych rodników. Wolne rodniki są to atomy lub grupy atomów obdarzone bardzo małą trwałością chemiczną. W związku z tym łączą się one w większe ugrupowania lub odwrotnie, rozpadają na mniejsze zespoły. W wyniku procesu zanikania rodników następuje wyzwolenie bardzo dużych ilości energii, o wiele większych niż podczas procesu spalania. Zjawisko to można wyjaśnić, powołując się na znany powszechnie mechanizm reakcji chemicznych. Aby spalanie mogło dojść do skutku, cząsteczki paliwa i utleniacza muszą najpierw ulec rozpadowi na wolne rodniki. W dalszej fazie te wolne rodniki reagują ze sobą, tworząc ostateczne produkty reakcji chemicznych. Proces tworzenia się wolnych rodników jest jednak związany z pochłanianiem znacznych ilości energii, takich samych, jakie wyzwalają się następnie przy ich łączeniu. Z tego powodu energia wywiązująca się w czasie przeciętnych reakcji chemicznych nie może być zbyt wielka, ponieważ stanowi jedynie resztę ogólnie wytworzonej energii, zmniejszonej o energię zużytą na wstępne utworzenie wolnych rodników.

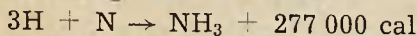
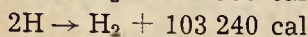
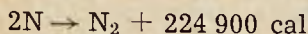
Do tworzenia wolnych rodników można wykorzystać najrozmaitsze źródła energii, takie jak: łuk elektryczny, wyładowania

elektryczne wielkiej częstotliwości, promieniowanie ultrafioletowe lub reaktory rozszczepieniowe. Dla celów praktycznych należałoby wytworzone w odpowiednich zakładach produkcyjnych wolne rodniki przechowywać w zbiornikach, tak jak magazynuje się obecnie zwykłe materiały pędne.

Jedną ze znanych obecnie metod przedłużania czasu istnienia wolnych rodników na okresy rzędu godzin, a nawet dni (która jednak nie wyszła ze stadium badań laboratoryjnych), jest ich zamrażanie do odpowiedniej temperatury, np. -180°C .

Ostatnie badania przeprowadzone za pomocą rakiet wykazały, że powietrze poczynając od wysokości 80 km zawiera duży procent zdysocjowanego tlenu. Dysocjacja tlenu (czyli rozpad cząstek tlenu na wolne rodniki) zachodzi pod wpływem działania promieni ultrafioletowych. Wysunięto już koncepcję silnika strumieniowego, w którym wykorzystałoby się energię tych rodników do przyspieszenia strugi przepływającego powietrza.

Poniżej zestawiono kilka przykładowych reakcji łączenia się rodników:



4.3. ENERGIA JĄDROWA

Dotychczas omówione źródła energii są niewystarczające do realizacji wszystkich pomysłów z dziedziny zastosowań techniki lotniczej i rakietowej. Szczególnie loty kosmiczne będą wymagać większych impulsów właściwych, niż mogą dostarczyć obecnie wykorzystywane paliwa chemiczne. Trzeba poza tym uwzględnić fakt, że złoża ropy i węgla, jako wyjątkowe, nie będące w równowadze chemicznej elementy ziemi, zostaną niedługo wyczerpane. Poszukiwanie nowych źródeł energii stało się więc koniecznością. Źródła te zostały odkryte w wyniku szczegółowych fizyko-chemicznych badań struktury materii, a szczególnie struktury atomu i jego elementów.

Punktem wyjścia w tych badaniach jest orbitalny model atomu, według którego ujemnie naładowane elektrony obiegają centralnie położone jądro o ładunku dodatnim.

Właściwości atomu są określone przez dwa rodzaje sił: siły elektromagnetyczne i siły jądrowe.

Siły elektromagnetyczne są już niemal całkowicie poznane i ujęte w ogólną teorię; natomiast wszystko, co jest obecnie wiadome o siłach jądrowych, opiera się na doświadczalnych faktach i roboczych hipotezach.

Jedną z podstawowych własności sił jądrowych jest ich krótki zasięg działania ($\sim 10^{-13}$ cm), co uniemożliwia pomiar i tym samym utrudnia bliższe zbadanie.

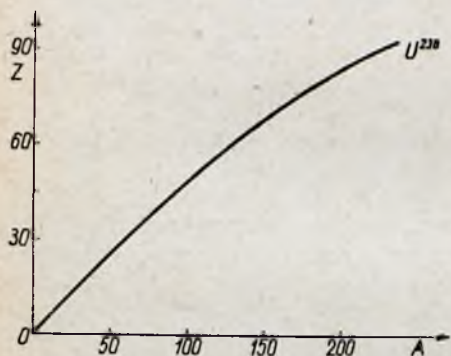
Zgodnie z obecnymi pojęciami jądro składa się tylko z protonów i neutronów. Na tej podstawie przyjmuje się, że tworzą one zespół dwu parametrów i można je przedstawić w układzie dwu współrzędnych.

Najczęściej stosowanymi współrzędnymi są:

Z — liczba porządkowa, czyli liczba protonów, i A — liczba masowa, czyli całkowita liczba neutronów. Przy wyrażeniu jądra za pomocą symbolu chemicznego jego atomu dodaje się: Z — z lewej strony u dołu, a A — z prawej strony u góry. Tak więc ogólnie jądro przedstawia się za pomocą wyrażenia

$$z()^A$$

Zgodnie z tym zapisem neutron oznacza się przez ${}_0n^1$, proton przez ${}_1H^1$, a deutron (jądro deuteru) przez ${}_1H^2$. Jądra naturalne zajmują miejsce na wykresie (Z, A) z bardzo lekkim odchyleniem wzdłuż tzw. krzywej trwałości (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Krzywa trwałości

Szereg występujących w przyrodzie jąder jest nie-trwałych, w wyniku czego są one promieniotwórcze (np. jądro uranu ${}_{92}U^{235}$ lub toru ${}_{90}Th^{232}$).

Zagadnienia trwałości prowadzą bezpośrednio do zagadnień energii. Stwierdzono mianowicie, że masa atomu jest zawsze mniejsza od sumy mas tworzących go: protonu, neutronu i elektronów orbitalnych. Te rozbieżności tłumaczy się istnieniem energii wiązania oraz zależnością Einsteina.

$$E = mc^2$$

z której wynika, że masa m i energia E są równoważne, lecz wyrażone w jednostkach różniących się o wielkość równą kwadratowi prędkości światła c .

Zarówno w atomie, jak i cząsteczce jądro przedstawia układ kwantowy i może istnieć w stanach o różnych poziomach energetycznych. Pod wpływem zderzenia jądro zostaje wytrącone ze

stanu podstawowego i przechodzi w stan wzbudzenia odznaczający się wyższym poziomem energetycznym. Ze stanu wzbudzenia do stanu podstawowego jądro może wrócić dopiero po wyemitowaniu dawki energii wchłoniętej podczas zderzenia. Jądro w stanie wzbudzenia oznacza się symbolem

$$z^*()^A$$

Reakcje jądrowe, podobnie jak wszystkie procesy zachodzące w przyrodzie, są ograniczone prawami zachowania. Będą to: prawo zachowania energii, prawo zachowania ładunku oraz prawo zachowania ilości nukleonów. Reakcje jądrowe można podzielić na dwie grupy: reakcje samorzutne i reakcje wywołane przez zderzenia. W reakcjach samorzutnych rozróżnia się następujące procesy:

— przemiana gamma, czyli emisja fotonu przez jądro w czasie jego przejścia ze stanu wzbudzenia do stanu podstawowego

$$z^*()^A \rightarrow z()^A + \gamma + E$$

Wydzielona energia E jest unoszona przez promieniowanie γ ;

— przemiana beta, czyli emisja elektronu e i neutrino ν przez jądro nie leżące na krzywej trwałości. W procesie tym liczba masowa A pozostaje bez zmiany, natomiast Z zwiększa się lub zmniejsza zależnie od tego, czy emitowany elektron jest e^- czy e^+

$$z()^A \rightarrow z_{+1}()^A + e^- + \nu + E \quad (\text{emisja elektronów})$$

lub

$$z()^A \rightarrow z_{-1}()^A + e^+ + \nu + E \quad (\text{emisja protonów});$$

— proces rozszczepienia, czyli rozpad jądra na dwa elementy (i czasem jeszcze na pewną ilość neutronów).

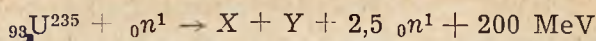
Jeśli przyjąć, że obydwie cząstki zachowują po rozszczepieniu ten sam stosunek Z do A , to reakcję tę można napisać w postaci równania

$$z()^A \rightarrow xz()^{xA} + (1-x)z()^{(1-x)A} + E$$

gdzie x może się zmieniać od 0 do 0,5, a E jest energią wyzwoloną w procesie rozszczepiania, która przechodzi do fragmentów jądra jako energia kinetyczna.

Interesujące z punktu widzenia techniki rakietowej reakcje jądrowe dzielą się na reakcje rozszczepieniowe jąder ciężkich i reakcje syntezy jąder lekkich.

Proces rozszczepiania ciężkich jąder atomowych uranu i plutonu przebiega wg następujących reakcji

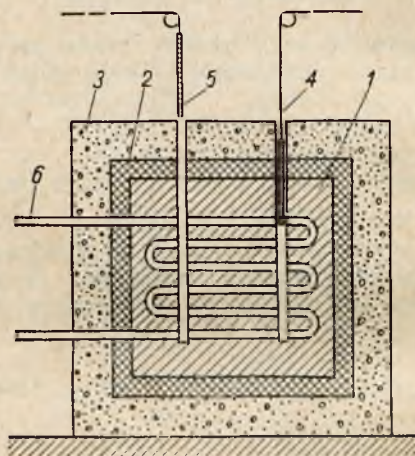


gdzie: X, Y, M, N — produkty rozpadu,

U, Pu — symbole pierwiastków uranu i plutonu,

${}_0^1\text{n}$ — neutron, którego zderzenie z jądrem U lub Pu wywołuje reakcję.

Praktyczna realizacja tego procesu zachodzi w reaktorach rozszczepieniowych (rys. 4.3).



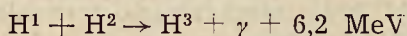
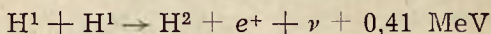
Rys. 4.3. Schemat reaktora rozszczepieniowego (jądrowego):

1 — rdzeń, 2 — reflektor, 3 — osłona,
4 — pręt sterujący, 5 — pręt bezpieczeństwa, 6 — układ chłodzący

Głównym elementem składowym reaktora rozszczepieniowego jest rdzeń. W rdzeniu znajduje się materiał rozszczepialny w takiej ilości, aby mogła w nim zajść reakcja łańcuchowa. Do zapoczątkowania i kontynuowania tej reakcji konieczne jest wytworzenie i stałe odświeżanie strumienia neutronów rozszczepiających jądra. W tym celu wystarczy pochłaniający neutrony uran naturalny U^{238} wzbogacić w jego izotop U^{235} , będący wydajnym źródłem emisji neutronów. Nie kontrolowana reakcja rozszczepieniowa ma przebieg lawinowy i prowadzi do zniszczenia reaktora. W celu umożliwienia regulacji prędkości reakcji stosuje się pręty sterujące wykonane z materiałów silnie pochłaniających neut-

rony, takich jak kadm czy węgiel boru. Zmieniając zanurzenie prętów sterujących we wnętrzu reaktora, można odpowiednio wpływać na przebieg reakcji rozszczepienia. Wytworzona w reaktorze energia cieplna jest odprowadzana na zewnątrz za pomocą układu chłodzenia.

Inny sposób wyzwala energii jądrowej polega na syntezie jąder najlżejszych, a zwłaszcza izotopów wodoru: protu, deuteru i trytu. W celu zrealizowania w praktyce takiej syntezy trzeba nadać jądrom odpowiednio wielką energię kinetyczną. Energię taką jądra uzyskują po ogrzaniu ich do temperatury wielu milionów stopni (np. wykorzystując w tym celu proces rozszczepieniowy). Dlatego reakcje syntezy nazywa się reakcjami termojądrowymi. Kilka przykładowych reakcji termojądrowych przedstawiają następujące równania:



LITERATURA DO ROZDZIAŁU 4:

- 4.1. B. Lewis, R. Pease, H. Taylor: *Combustion Processes*. Princeton University Press. 1956.
- 4.2. G. Siniarijew, M. Dobrowolski: *Silniki rakietowe na paliwo płynne*. Wyd. MON, Warszawa 1958.
- 4.3. J. Stanuch, J. Świdziński, A. Wachal, O. Wołczek: *Rakiety — Środki napędowe*. PWT, Warszawa 1960.