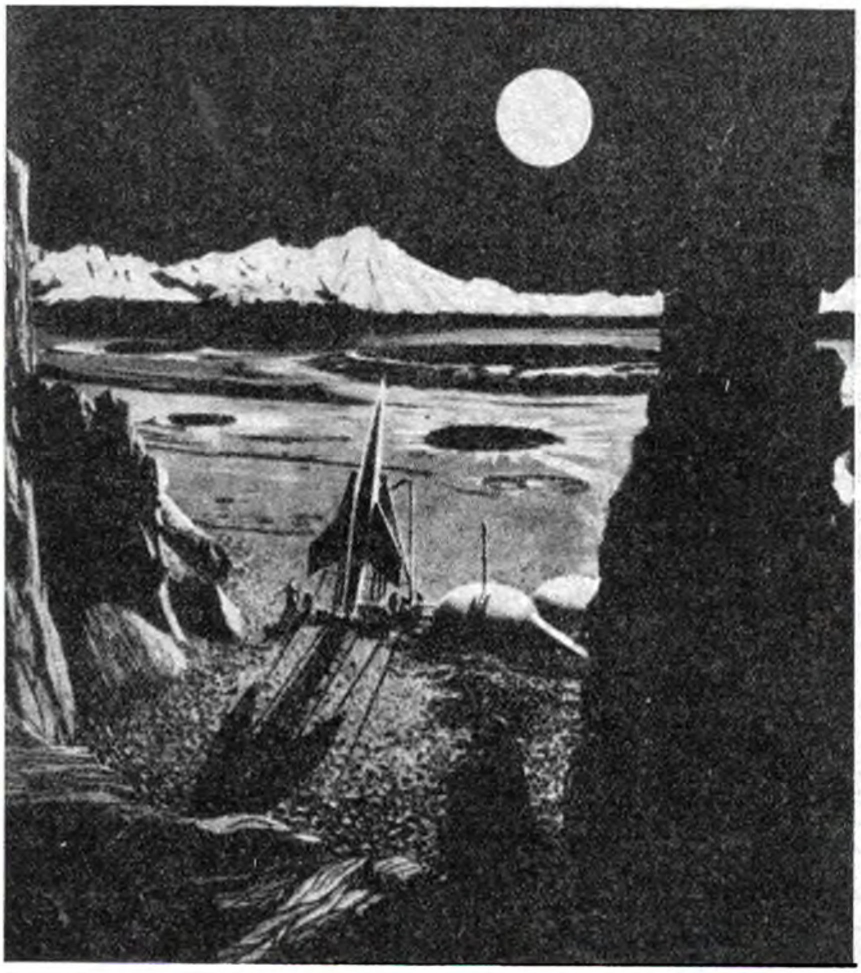
młody TECHNIK

MIESIĘCZNIK DLA MŁODZIEŻY

Okładka I: Rakieta atomowa na księżycu rys. S. Rozwadowski



Rakieta atomowa

W bieżącym roku mija 50 lat od powstania pierwszej, do dziś aktualnej, teorii lotu rakietowego, jaką dał światu pionier rakiety w ZSRR — Konstanty Ciołkowski. Zobaczmy, jakie postępy poczyniła ta teoria w minionym półwieczu. Druga połowa dwudziestego wieku zyska zapewne miano „epoki rakietowej", gdyż wedle wszelkich przypuszczeń niedługi już czas dzieli nas od utworzenia pierwszego sztucznego księżyca.

Nasi Czytelnicy znają już zasady konstrukcji rakiety, a także i sztucznego księżyca z artykułów zamieszczonych w „Młodym Techniku" w numerach 2 (rok 1952) i 6 (rok 1953). Obecnie pragniemy pomówić na temat, czy można użyć energii atomowej do napędu rakiety i jakie możliwości przynosi ze sobą jej zastosowanie.

Aby rzecz lepiej wyjaśnić, musimy naprzód poświęcić parę słów wzorowi Ciołkowskiego.

Wzór na stosunek mas

Rakieta jest pędzona siłą odrzutu w myśl III zasady dynamicznej Newtona o równości akcji i reakcji. Tę równość przedstawia się zazwyczaj równością pędów obu mas, gdzie przez „pęd" rozumie się iloczyn masy i jej szybkości. Gdy więc z łódki wyrzucamy kamień albo spalamy niewielki nabój w rakiecie chińskiej, to równanie pędów wyraża się prosto

$$m_1v_1 = m_2v_2$$

Znacznikami 1 i 2 odróżniamy od siebie dwie masy (np. łódki i kamienia) oraz ich szybkości.

Do obliczenia ilości potrzebnego paliwa w rakiecie, która porusza się nie na skutek jednorazowego wyrzucenia jakiejś masy (np. przez jednorazowy wybuch), ale która porusza się na skutek spalania w ciągu dłuższego czasu większej ilości paliwa, co stale zmniejsza masę lecącej rakiety (bo ubywa paliwa), powyższy prosty wzór fizyczny nie wystarcza. Toteż Ciołkowski zastosował do tego celu wzór różniczkowy, którego sens brzmi tak:

Jeżeli od masy rakiety (m) oderwie się nieskończenie mały ułamek masy paliwa (dm) z szybkością stałą (c), to szybkość rakiety wzrośnie o nieskończenie mały przyrost szybkości (dv).

A te cztery wartości muszą czynić zadość równaniu pędów. Powstanie wzór (różniczkowy): $m\,dv = -c dm$, z czego przez scałkowanie otrzymuje się słynny wzór na stosunek mas, w postaci:

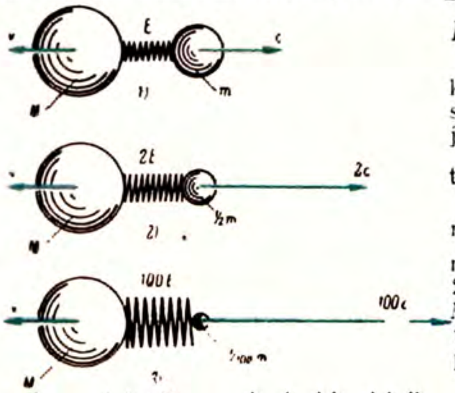
$$\frac{m_0}{m_1} = e^{\frac{v}{c}} \quad \text{albo} \quad \ln\frac{m_0}{m_1} = \frac{v}{c}$$

W tych wzorach oznaczają:

- m_0 — masę startową rakiety, czyli masę pojazdu wraz z zapasem paliwa przed rozpoczęciem lotu,
- m_1 — masę rakiety po wypaleniu paliwa,
- v — szybkość rakiety żądaną przez konstruktora,
- c — stałą szybkość wylotu spalin, zależną od rodzaju paliwa,
- e — liczbę 2,72, czyli zasadę logarytmów naturalnych.

Jakże możemy rozumieć powyższe wzory? Rzecz objaśni nam najlepiej przykład liczbowy. Konstruktor chce zbudować rakietę, która ma spełniać rolę sztucznego księżyca. Aby nie spotkał go smutny los spalenia się (tak jak meteory, które świecą już na wys. 120 km od powierzchni Ziemi), bezpieczna praktyczna wysokość, na jakiej mógłby się poruszać, powinna wynosić ok. 1000 km, co stanowi górną granicę przedostatniej części naszej ziemskiej atmosfery — jonosfery. Na tej wysokości do stałego „obiegania" Ziemi po obwodzie współśrodkowego koła potrzebna jest minimalna szybkość 7,32 km/sek., którą konstruktor musi zagwarantować tego rodzaju rakiecie. Dla prostoty obliczeń podnieśmy ją do 7,8 km/sek., a wtedy tor lotu naszego sztucznego księżyca zmieni się z kołowego na eliptyczny Z innych obliczeń wynika, że masa rakiety bez paliwa winna wynosić, powiedzmy, m_1 = 30 ton. Do dyspozycji mamy paliwo chemiczne, którego gazy spalinowe wylatują z rakiety z szybkością c = 3,9 km/sek. Pytanie brzmi: Ile paliwa musi wziąć rakieta, aby w podanych warunkach mogła osiągnąć szybkość 7,8 km/sek.?

Odpowiedź na to pytanie daje wzór na stosunek mas. Jeżeli z danych wynika, że $\frac{v}{c}$ = 2, to „e" (czyli 2,72) do potęgi drugiej wyniesie w przybliżeniu 7,4. To oznacza, że masa startowa m_0 musi być 7,4 raza większa od masy końcowej 30 ton, czyli musi wynieść 222 tony. Przy masie rakiety netto 30 ton ilość paliwa wyniesie zatem 192 tony. Tak przedstawia się w idealnym wypadku użytek z wzoru Ciołkowskiego na stosunek mas. Dlaczego — „w idealnym wypadku"? Bo nie uwzględniamy tu oporu powietrza ani straty na szybkości skutkiem działania siły ziemskiego przyciągania itp. Uwzględniając te dalsze wydatki energii, otrzymamy wzór na stosunek mas znacznie niekorzystniejszy, tak że za pomocą pojedynczej, czyli jednostopniowej rakiety wytworzenie szybkości satelitarnej nie leży w granicach możliwości, jeżeli mowa o paliwie chemicznym.



Aby uzyskać taki sam odrzut większej kuli o masie M i szybkości v (pęd Mv = mc = const.), trzeba przy zmniejszeniu masy kuli m podwyższać proporcjonalnie jej szybkość c, tak, żeby pęd (mc, $\frac{1}{2}$m. 2c, $\frac{1}{100}$ m. 100c) pozostał niezmieniony.

Jednak równocześnie wzrasta w tym samym stopniu energia kuli mniejszej (E, 2 E, 100 E), wobec czego moc sprężyny (czyli „silnika"), nadającej ruch obu kulom, musi być odpowiednio większa.

Energia kuli większej ($\frac{1}{2}$ Mv²) jest ciągle stała i nie zmienia się, stanowiąc zresztą w każdym wypadku $\frac{m}{M}$-tą część energii kuli mniejszej.

KONSTANTY CIOŁKOWSKI

Z wzoru widzimy, że gdyby szybkość c była większa, to zmalałby stosunek mas. Gdyby istniało paliwo dające szybkość spalin np. 7,8 km/sek.*), to $\frac{v}{c}$ wyniosłoby 1 (jeden), a stosunek mas byłby $\frac{m_0}{m_1}$ = 2,72, czyli masa startowa byłaby iloczynem z 2,72 i 30, czyli wynosiłaby 81,6 tony. Masa paliwa samego wyniosłaby już tylko 51,6 tony zamiast 192, jak w przykładzie poprzednim.

Energia atomowa a rakieta

Powyższe rozumowanie ukazuje nam od razu możliwości, jakie niesie ze sobą przypuszczalne stosowanie energii atomowej do napędu rakiety. Oto podczas rozpadu atomów np. uranu wytwarzają się szybkie cząstki, których szybkości są rzędu 10 000 i więcej kilometrów na sekundę. To znaczy, że „c" z wzoru Ciołkowskiego będzie wynosić w tym wypadku nie jakieś 4 czy 7 kilometrów, ale 10 tysięcy kilometrów na sekundę!

Wartość ułamka $\frac{v}{c}$ przy bardzo wielkim mianowniku zmierza do liczby niewiele większej od zera, wobec czego $e^{\frac{v}{c}}$ maleje niemal do jedności. Weźmy znów przykład liczbowy. Niech c wynosi 7 800 km/sek. Wartość $\frac{v}{c}$ będzie wtedy 0,001, a $e^{\frac{v}{c}}$ wypadnie na 1,001. To znaczy, że masa startowa będzie 1,001 raza większa od 30 ton, czyli wyniesie 30 ton i 30 kg. Te 30 kg będą przedstawiać masę „paliwa atomowego", które trzeba z rakiety wyrzucić z szybkością 7 800 km/sek., aby rakieta uzyskała szybkość 7,8 km/sek.

Jednakże jakkolwiek cząstki rozpadu jądra atomowego posiadają szybkości znacznie większe niż 7800 km/sek, sprawa nie przedstawia się wcale tak różowo!

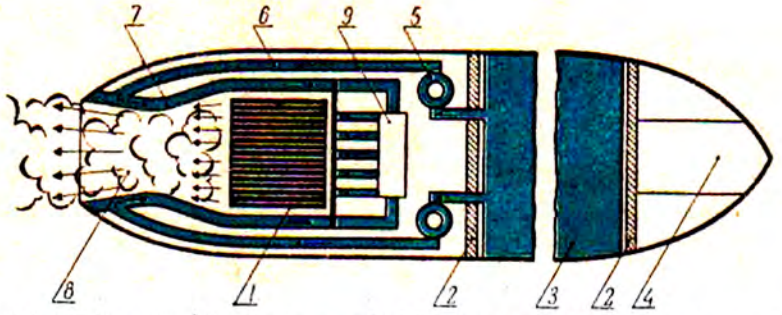
Oto po pierwsze, owe cząstki rozpadu poruszają się w zupełnie dowolnych, przypadkowych kierunkach, niezależnych od woli konstruktora. Przynajmniej, tak jest — dzisiaj. Trzeba zatem znaleźć sposób, aby produkty rozpadu atomowego można było „skanalizować", czyli nadać im kształt jednokierunkowej strugi w tył rakiety, wzdłuż jej osi. Inaczej działanie odrzutu nie nastąpi.

Można by tego dokonać np. przez zastosowanie odpowiednio silnego pola elektrostatycznego lub elektromagnetycznego. Są to jednak urządzenia powiększające masę rakiety w wysokim stopniu, a poza tym nieskuteczne wobec cząstek, które nie posiadają ładunków elektrycznych. Kierować dałyby się jony i elektrony, atomy natomiast i neutrony — nie.

Sprawa jednak wyzyskania ogromnych szybkości produktów rozpadu atomowego ma jednak jeszcze inny, również bardzo niekorzystny aspekt. Pokażemy to na przykładzie. Z rakiety V-2 co sekundę ulatywało przeszło 100 kg (dokładnie 125 kg z tego 75 kg tlenu i 50 kg alkoholu) gazów spalinowych z szybkością około 2,25 km/sek. (w rzeczywistości 2,135 km). Gdy według wzoru $\frac{1}{2}$ mv² obliczymy energię odrzutu na sekundę, wypadnie moc około 340 000 KM (koni mechanicznych). Gdy teraz zwiększymy tysiąckrotnie szybkość wylotu i tyleż razy zmniejszymy masę (aby pęd pozostał niezmieniony), to jednak moc odrzutu wzrośnie 1000 razy! To znaczy wyniesie ona około 340 milionów koni mechanicznych! Trzeba dobrze zrozumieć wymowę tych liczb. Rakieta będzie lecieć, jak leciała poprzednio, czyli skala przyśpieszenia masy rakiety pozostanie niezmieniona. A natomiast moc odrzutu, zabierana przez ulatujące spaliny, będzie tysiąckrotnie większa.

Moc tę jednak musi wytworzyć silnik. Wskutek małej wydajności silnika rakietowego duża ilość ciepła ucieka w masę rakiety. Jeżeli tylko niewielki procent ciepła (np. 10%, co wcale nie jest dużo) potrzebnego do wy-

*) Paliwo takie istnieje i obecnie znajduje się w stadium prób i doświadczeń. Jest nim ciekły wodór + ciekły ozon. Teoretyczna szybkość wylotu gazów w_t = 11,76 km/sek. Specjaliści od zagadnień rakietowych wróżą temu paliwu świetną przyszłość.



Schemat rakiety o napędzie atomowym pośrednim. 1 — reaktor uranowy, 2 — ekrany chroniące kabinę przed promieniowaniem, 3 — zbiornik wody (masy wyrzutowej), 4 — kabina pilota, 5 — pompy wodne, 6 — przewód wodny, 7 — płaszcz chłodzący reaktor, 8 — dysza wylotowa dla masy wyrzutowej, 9 — zespół sterujący dopływ wody
Krążenie wody: Ze zbiornika (3) przez pompy (5) przewody (6), płaszcz chłodzący (7) do zespołu sterującego (9), a stąd do reaktora (1) i w postaci pary przez wylot (8) na zewnątrz

tworzenia mocy 340 milionów koni przeniesie się na rakietę, to w ułamku sekundy rakieta „ulotni się" bez śladu, nie skutkiem szybkości, lecz po prostu przez wyparowanie! A to jest, każdy przyzna, wynik całkiem niepożądany.

Tak tedy napęd „bezpośredni" rakiety przez odrzut cząstek rozpadu nie wygląda zbyt zachęcająco.

Napęd atomowy „pośredni"

Istnieje jednak jeszcze inna możliwość. Przy napędzie bezpośrednim produkty rozpadu materii promieniotwórczej zostają niejako zdegradowane do roli owych kamyków, które wioślarz wyrzuca z łodzi, chcąc nam zademonstrować, iż w tym wypadku wystąpi działanie odrzutu, przy czym „silnikiem", który i kamieniowi, i łodzi dodaje energii kinetycznej, jest — oczywiście — sam wioślarz.

Jak widzieliśmy, ulatujące z ogromnymi szybkościami produkty rozpadu atomowego zabierają ze sobą olbrzymie ilości energii, podczas gdy rakieta o wielkiej masie otrzymuje jej okruchy. Napęd taki jest przeto ogromnie nieekonomiczny i choć sprawność silnika w tych warunkach ze względu na koszt (bardzo małe zużycie paliwa w porównaniu do silników nie wykorzystujących jako paliwo energii jądrowej) praktycznie nie wchodzi w rachubę, to jednak ze względu na trudności „cieplne", omówione powyżej, nie należy się spodziewać, aby mógł on znaleźć w przyszłości zastosowanie.

Wobec tego konstruktorzy rakiet wpadli na pomysł, aby rolę masy wyrzutowej odgrywała jakaś pośrednicząca substancja, której odpowiedni zapas będzie posiadać dana rakieta. Ze stosu atomowego będzie się czerpać ciepło, czyli będzie się wykorzystywać naprawdę samą energię atomową, za pomocą której nadawać się będzie owej obcej masie — potrzebną szybkość. Szybkość taka będzie utrzymana w granicach znacznie niższych, przez co ekonomia ruchu będzie bez porównania lepsza.

Masą wyrzutową może być np. woda. Ogrzana przez stos do wysokiej temperatury, woda wyparuje i para będzie uchodzić szybkim strumieniem, dając rakiecie siłę ciągu naprzód. Temperatura mogłaby być ewentualnie nawet tak wysoka, że cząsteczki pary ulegałyby dysocjacji na atomy wodoru i tlenu, które uzyskiwałyby większą szybkość niż cięższe cząsteczki pary wodnej.

Niestety, i ten tak ponętny obraz ma swoje skazy i plamy. Oto uran ma temperaturę topnienia 1150°C. Stos uranowy nie może przeto pracować w temperaturze wyższej, jak tylko około tysiąca stopni. Podczas startu i w pierwszych minutach lotu rakieta musi wyrzucać tony (tej wody), aby uzyskać stosowne przyspieszenie. Żeby woda pierwotnie zimna mogła w ciągu sekundy ogrzać się do temperatury bliskiej tysiąca stopni, trzeba zastosować stosy o ogromnych powierzchniach ogrzewania, a więc wielkie i kosztowne. Szybkość zaś, jeżeli idzie o parę wodną, w temperaturze 1000°C, czyli 1273°K (absolutnej) — nie będzie wielka.

Wzór praktyczny na szybkość wylotu gazów ma postać:

$$c = k \sqrt{\frac{T}{M}} \text{ [km/sek.]}$$

gdzie c, to szukana szybkość, T — temperatura absolutna, M — masa cząsteczkowa wyrzucanego medium (substancji pośredniczącej). Stała k, dla silnika pracującego w próżni, wynosi 0,25, a pracującego pod zwykłym ciśnieniem atmosferycznym jest znacznie mniejsza. Ponieważ woda ma masę cząsteczkową 18 (dwa atomy wodoru 1 + 1, i jeden atom tlenu 16), przeto w próżni szybkość ulatującej pary wyniosłaby około 2,1 km/sek. Policzcie sami, co powie wzór na stosunek mas, gdy za v wstawi się tam 7,8, a za c — 2,1 km/sek. Do rachunku lepszy jest wzór drugi, zawierający logarytm naturalny $\frac{m_0}{m_1}$.

Jeżeli zamiast wody weźmiemy wodór o masie cząsteczkowej 2, to jego szybkość w próżni wyniesie według powyższego wzoru przeszło 6 km/sek. Jest to już wynik znacznie lepszy. Ale kłopot z podgrzewaniem gazu jest jeszcze większy niż przy użyciu wody. Poza tym wodór jest gazem drogim, a trzeba z rakiety wyrzucać ogromne jego ilości.

Rakieta jonowa

Rozważa się także sprawę napędu rakiety za pomocą strumienia jonów, który wypływając z odpowiednią szybkością dałby też potrzebny odrzut. Za pomocą stosowanego pola elektrostatystycznego można by wytwarzać wiązki jonów lub elektronów, poruszające się z szybkościami zbliżonymi do szybkości światła. W tym wypadku okazuje się korzystniejszą rzeczą stosowanie medium o bardzo wielkiej masie atomowej, np. rtęci (M = 200,6) jako środka napędowego.

Do wytworzenia szybkości 100 km/sek. (rtęci) i przy przyspieszeniu (rakiety) zaledwie 10 cm/sek.^{2} urządzenie musiałoby pracować przy napięciu 10 000 woltów, a natężenie prądu wyniosłoby około 480 amperów na każdą tonę masy rakiety. Zużycie rtęci wyniosłoby około 1 gram na tonę masy rakiety i na sekundę czasu. Wynika z tego, że we wnętrzu rakiety musiałaby się mieścić elektrownia o mocy prądu 4800 kilowatów, licząc na każdą tonę masy rakiety. Urządzenie to jest nie do pomyślenia przy zastosowaniu obecnych źródeł energetycznych.

Sprawa jednak nabiera znów innego aspektu, gdy się zważy, że już udały się pierwsze próby wytwarzania prądu eletrycznego bezpośrednio ze stosu atomowego, tj. bez pośrednictwa urządzeń maszynowych, czyli prądnic.

Widoki na przyszłość

Na pierwszy rzut oka z powyższego opisu można wysnuć wnioski raczej pesymistyczne. Zdawałoby się, że w 50 lat po ogłoszeniu teorii rakiety przez Ciołkowskiego sprawa jej zastosowania wyglądałaby dość beznadziejnie. Jednak ostatnie obliczenia wskazują na to, że przy użyciu rakiety dwustopniowej można by nawet za pomocą napędu paliwem chemicznym uzyskać szybkość satelitarną, czyli utworzyć sztuczny księżyc.

Jednakże koszta takiego przedsięwzięcia są olbrzymie.

Co się tyczy napędu atomowego, bezpośredniego lub pośredniego, trudności (i koszta) — są też ogromne.

Jednakże nie powinniśmy w ocenie tej niewesołej sytuacji zapominać, iż sprawa rozwoju i użyteczności energii atomowej znajduje się dziś jeszcze w stanie niemowlęctwa. Niemowlę pokazuje dopiero pierwsze ząbki, zresztą straszliwe, gdy używa się ich w niewłaściwy sposób.

W ciągu ostatnich dziesięciu lat nastąpił ogromny rozwój nauki otrzymywania i wykorzystania energii atomowej. Rozwój ten trwa nadal. Trzeba przeto mieć nadzieję, że opisane trudności zostaną w taki czy inny sposób pokonane i że jednak polecimy na Księżyc rakietą atomową.

Eustachy Białoborski