

Mandryka, A. P.

Fizyczne podstawy odrzutu działa i ruchu rakiety w ujęciu uczonych XVII i XVIII wieku

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 7/4, 447-460

1962

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



A. MANDRYKA

FIZYCZNE PODSTAWY ODRZUTU DZIAŁA I RUCHU
RAKIETY W UJĘCIU UCZONYCH XVII I XVIII WIEKU *

W połowie naszego stulecia zasada odrzutu uzyskała szerokie zastosowanie dla nadawania samolotom i pociskom raketowym prędkości dźwiękowych i ponaddźwiękowych. W ostatnich latach literatura z zakresu teorii ruchu rakiet wzbogaciła się o nowe pozycje, przeznaczone zarówno dla szerokiego kręgu czytelników, jak i dla specjalistów. Uczni przeszli jednak długą drogę badań, zanim w końcu XVIII w. doszło do wyjaśnienia zasady poruszania się rakiet. Prawidłowy pogląd na to zagadnienie ustalili się w wyniku walki dwóch koncepcji. Pierwsza z nich opierała się na badaniu odrzutu działa — zjawiska analogicznego z ruchem rakiety i wywołanego takimi samymi czynnikami — i stopniowo przybrała formę równania zachowania pędu. Druga koncepcja wyjaśniała ruch rakiety odpychaniem jej od otaczającego powietrza przez uchodzące z dyszy produkty spalania. Według tego mylnego punktu widzenia rakiet nie może poruszać się w próżni, co wykluczałoby możliwość przeniknięcia w kosmos.

Odrzut działa obserwował już Leonardo da Vinci: „W charakterze opory bierze się kawałek ołowiu i jako cel również sztabkę ołowiu. Między tylną częścią działa i ołowianą oporą umieszcza się żelazną kulę, taką samą jak ta, która zostaje wystrzelona w przód. Większa siła działa na tę kulę, która pozostawi większy odcisk”¹.

Do wieku XVII poglądy na zasadę odrzutu i ruchu rakiety różniły się mocno między sobą, co uniemożliwia podanie jasnego obrazu ówczesnych prób wyjaśnienia tych zjawisk. Można tylko wspomnieć, że np.

* Artykuł nadesłany z Leningradu przez znanego już czytelnikom „Kwartalnika” (por. nr 3—4/1960) kandydata nauk technicznych A. Mandrykę, tłumaczył Andrzej Pszczółkowski.

¹ Por.: Hans Schimank, *Schiess und Sprengtechnisches bei Leonardo da Vinci*. „Zeitschrift für das gesamte Schiess und Sprengstoffwesen”. München, nr 13/1919, s. 218.

K. Kyeser już w 1405 r. przyczynę ruchu rakiety trafnie upatrywał w wypływie gazów prochowych przez otwór w jej tylnej części².

Również wiek XVII nie przyniósł prac, których głównym zadaniem byłoby ustalić zasadę poruszania się rakiet lub przyczynę odrzutu lufy działa. Odosobnione jednak wypowiedzi na ten temat spotkać można było w podręcznikach poświęconych rakietom i artylerii. Do tego rodzaju prac należy dzieło Kazimierza Siemienowicza³ z 1650 r., w którym podał on, prócz wielu innych projektów, opis rakiety wielostopniowej⁴. Naturalnie Siemienowicz nie mógł nie zastanawiać się nad przyczyną ruchu rakiety. Możliwe, że i na to pytanie starał się dać odpowiedź w drugiej części swojej pracy, opracowanej przez Elricha, która niestety nie zachowała się.

Jako jeden z pierwszych zjawisko odrzutu i jego przyczynę — ogólnie biorąc prawidłowo — opisał Rivault de Flurance⁵. W pracy z 1608 r. wyjaśniał on odrzut rozszerzaniem się gazów prochowych, czyli — zgodnie z pojęciem uczonych tego okresu — sprężystego fluidu. Zwrócił on również uwagę na rolę wprawianego w ruch pocisku. Wymieniając poruszane części Rivault de Flurance pisał: „...kula D powoduje odrzut armaty przy wystrzale, ponieważ zapłon następuje w G⁶, a rozszerzanie się sprężystego fluidu rozpoczyna się wzdłuż linii GF⁷”. Następnie podkreślał on, że gazy prochowe działają zarówno na pocisk, jak i na tylną część przewodu lufy: „W ten sposób ciśnienie wypierane jest jednocześnie w kierunku FA”, tzn. od przekroju odpowiadającego zapalnikowi G w kierunku tylnej ściany lufy, „jak i w kierunku FB” — od tegoż przekroju w kierunku kuli. „Wobec tego — kontynuuje Rivault de Flurance — w czasie rozprężania powierzchnia FG stanowi granicę dla obu ruchów zachodzących z jednej i drugiej strony”.

Jest to twierdzenie bardzo interesujące dla historii balistyki wewnętrznej. Mówi ono o nieruchomości względem lufy pewnej środkowej, poprzecznej warstwy gazu.

„Zatem ciśnienie FA — wnioskował Rivault de Flurance — powoduje odrzut, a FD wyrzuca pocisk. W rezultacie działło cofa się jednocześnie z wystrzałem”. Wytłumaczył on więc dostatecznie przekonywająco — jak na owe czasy — zjawisko odrzutu działa i ruchu pocisku

² Por.: J. R. Partington, *A History of Greek Fire and Gunpowder*. Cambridge 1960, s. 148.

³ C. Siemienowicz, *Artis magnae Artilleriae*, pars I, Amsterdam 1650.

⁴ Por.: M. Subotowicz, *Kazimierz Siemienowicz i jego wkład do nauki o rakietach*. „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki”, nr 3/1957, s. 486—513.

⁵ Rivault de Flurance, *Les éléments de l'artillerie concernant tant la théorie que la pratique du canon*. Paris 1608, s. 94—95.

⁶ Zapalnik w bocznej ścianie tylnej części lufy (przyp. autora artykułu).

⁷ Przekrój zapalnika (przyp. autora artykułu).

działaniem ciśnienia gazów prochowych. Jednakże wielkość odrzutu uzależnił on od położenia zapalnika: „...gdyby zapłon nastąpił w punkcie A, w tylnej części przewodu, w momencie rozprężenia zaszedłby tylko niewielki odrzut, a to wskutek oporu, na jaki napotkałby rozszerzający się fluid w tylnej części przewodu, ponieważ duże ciśnienie i opór kuli powodują odrzut”.

Z powyższego wynika, że umieszczenie zapłonu w tylnej części przewodu lufy powodowałoby zanik odrzutu. Widocznie Rivault de Flurance uważał, że w takim przypadku gazy rozprężyłyby się tylko w kierunku pocisku, nie działając na tylną część lufy.

Rivault de Flurance uważał więc, że przyczyna odrzutu działa i ruchu pocisku jest identyczna — jest ciśnienie gazów prochowych. Jednakże nie wyszedł on poza jakościowe wyjaśnienie tych zjawisk. Nie wspominał również o zależności między masami przemieszczanych części a ich prędkościami.

W sposób znacznie mniej wyraźny niż Rivault de Flurance, Mestre o zjawisku odrzutu pisał w 70 lat później. Sądząc po jego podręczniku z roku 1679, Mestre był znacznie mniej doświadczonym artylerzystą niż jego poprzednik, którego pracy najwidoczniej nie znał. Nie mówił on już o odrzucie i ruchu kuli jako o rezultacie działania sprężystego fluidu. Ograniczył się jedynie do wzmianki o „rozprzestrzeniającym się ogniu”: „Ogień, zapaliwszy proch, rozszerza się z taką szybkością, że jednocześnie z wybuchem, po wprawieniu w ruch kuli, powoduje również odrzut. Aby to lepiej zrozumieć, można powiedzieć inaczej: po zapaleniu prochu płomień początkowo szuka wyjścia, a częściowo cofając się wskutek trudności w pełnym ruchu naprzód, napotyka zaraz na opór, który poddaje się jednocześnie z kulą w rezultacie odrzutu”⁸.

Jednak i Mestre zrobił krok naprzód, dostrzegając wielką siłę odrzutu: „Zadziwiająco wielkie ciśnienie wytwarza proch, nadając działu dużą siłę przy odrzucie. Jeśli działo napotyka na opór dąży ono do przewyciężenia lub złamania tego, co mu przeciwdziało”⁹.

Na początku XVIII w. badaniem zjawiska odrzutu i przyczyny ruchu rakiety zajął się de la Hire — już nie artylerzysta, lecz fizyk i matematyk, członek Paryskiej Akademii Nauk. Rozpatrywał on oba te zjawiska łącznie, poprzedziwszy ich badanie wspólnymi, ogólnymi rozważaniami. Już to świadczyło o tym, że widział on łączność również w samej istocie tych zjawisk. Niestety, praca de la Hire'a nie została opublikowana, a o jej treści można sądzić tylko na podstawie streszczenia w *Histoire de l'Académie des Sciences de Paris* za 1702 r.

⁸ A. C. Mestre, *Traité physique des Corps compositifs agents et passifs dans l'Artillerie et la Pyrotechnie etc.* Francfort 1693, s. 183.

⁹ Tamże, s. 181.

De la Hire pokazał przede wszystkim na przykładzie sprężyny działanie sprężystego fluidu w przewodzie lufy i w kadłubie rakiety. Autor artykułu w *Historii Akademii*, relacjonując poglądy de la Hire'a¹⁰ pisał: „Sprężyna — np. zgięta blaszka — dąży do wyprostowania się z obu stron z jednakową siłą”. Jakaż będzie reakcja sprężyny w przypadku napotkania na obu końcach jednakowego oporu? A jeśli opór ten nie będzie jednakowy? „Aby ujawnić całą swoją siłę, sprężyna musi napotkać określony opór. Działa ona tym słabiej, im łatwiej i szybciej poddaje się ciało stawiające jej opór. Sprężyna daje większy efekt z jednej strony, jeśli napotyka opór na końcu przeciwnym. Teza ta otworzyła de la Hire'owi drogę do wyjaśnienia przyczyny odrzutu działa.

W mglisty sposób sformułował już zresztą tę tezę Mestre, którego podręcznika de la Hire najprawdopodobniej zresztą nie znał.

Badanie odrzutu działa zaczął de la Hire od jaśniejszego przedstawienia tego, co ustalił już Rivault de Flurance prawie 100 lat przed nim. „Impulsy w dzisiejszej terminologii ciśnienia — działające od osi przewodu lufy w kierunku jej ścianek równoważone są wytrzymałością lufy. Siły zaś działające wzdłuż osi przewodu w kierunkach przeciwnych wprawiają w ruch działło i pocisk.

„Okazuje się, że siła powodująca odrzut — kontynuował de la Hire — jest identyczna z tą, która wprawia w ruch kulę. Jak to się jednak dzieje, że kula zostaje wyrzucona na tak znaczną odległość, podczas gdy odrzut jest tak niewielki?... Tłumaczy się to tym, że działło napotyka na znacznie większe trudności w ruchu do tyłu niż kula w czasie ruchu w przód; ponieważ oba działania powoduje ta sama siła, droga przebyta przez kulę o tyle jest większa od odległości, na jaką przesunie się działło w rezultacie odrzutu, o ile trudności, na jakie napotyka kula w czasie ruchu, są mniejsze od tych, które działło pokonuje przy cofaniu się do tyłu. Zatem nieodzowne jest, aby działło w czasie odrzutu, który jest zawsze niewielki, napotykało na znaczny opór”.

Tak więc de la Hire wyjaśnił nieznaczną wielkość odrzutu (w porównaniu z drogą przebywaną przez kulę) wyłącznie wielkością oporu, na jaki napotyka działło, przewyższającego znacznie opór przeciwdziałający ruchowi kuli w powietrzu. Z tych rozważań wynikałoby, że przy braku tarcia między kołami a ziemią i tarć występujących przy obracaniu się kół wokół osi, odrzut działa i zasięg przelotu kuli powinny być jednakowe, ponieważ siły działające na tylną ścianę lufy i na kulę są równe. Rzeczywiście nieco dalej de la Hire pisał, że lufa zawieszona na osi obrotu, przebiegającej powyżej osi lufy prostopadle do płaszczyzny strzału, zostanie odrzucona bez porównania silniej niż w przy-

¹⁰ *Sur les effets du ressort de l'Air dans la Poudre à Canon et dans le Tonnerre. Histoire de l'Académie des Sciences 1702, s. 9—12.*

padku, gdy działo stoi na ziemi. Jednakże nie wspomniał on ani słowa o tym, że odrzut lufy zawsze pozostanie bardzo mały w porównaniu z odległością, na jaką wyrzucona jest kula. Nie wyjaśnił on sprzeczności, w jaką popadł, tłumacząc różnicę pomiędzy wielkością odrzutu a odległością przelotu kuli wyłącznie hamującym wpływem oporów. De la Hire nie przypisywał żadnego znaczenia masom przemieszczających się części i nawet nie wspomniał o nich. A przecież sformułował on poglądy na zasadę odrzutu w 15 lat po opublikowaniu dzieła Newtona, poświęconego mechanice. Wyjaśniając istotę swojego trzeciego prawa, Newton pisał:

„Jeśli jakiegokolwiek ciało uderzywszy w inne zmieni dzięki swej sile pęd tego ciała, to zmiana ta zaznaczy się w jego własnym pędzie, ale w kierunku przeciwnym, ponieważ wzajemne działanie tych ciał na siebie jest zawsze jednakowe. Powoduje ono jednakowe zmiany nie prędkości, lecz pędu przy założeniu oczywiście, że na te ciała nie działają żadne inne siły. Zmiany prędkości, zachodzące również w kierunkach przeciwnych, będą odwrotnie proporcjonalne do mas ciał, ponieważ zmiany pędu są jednakowe. Prawo to jest słuszne i dla przyciągania”¹¹.

Można było stąd nie tylko zaczerpnąć prawa wiążące masy ciał z działającymi na nie siłami, ale wprost wyjaśnić ilościową stronę zjawiska odrzutu. Nawet jednak tak znakomity matematyk, jakim był de la Hire, albowiem nie znał w ogóle zasad mechaniki Newtona, albo nie zrozumiał, albo — być może — nie przyjął ich, wiedziony często spotykaną nieufnością do nowych idei i metod.

Wyjaśnienie zjawiska odrzutu zastosował de la Hire i do ruchu rakiety: rakietę według niego „...nie jest niczym innym jak niewielką, bardzo lekką lufą, która dzięki zawartej wewnątrz zapalanej substancji wytwarza w powietrzu odrzut w kierunku części odtylcowej z tym większą prędkością, im większą prędkość posiada płonąca substancja u wylotu obróconego w dół otworu”¹².

De la Hire zupełnie jasno tłumaczył przyczynę wprawiającą w ruch rakieta. Ta niewielka lufa porusza się, jeśli przypomnieć wszystko, co mówił on wcześniej, pod działaniem ciśnienia gazów na jej odtylcową część. Brak tu już tarcia, które hamowało odrzut działa. Rakietę nie napotyka na opór powietrza, a przynajmniej de la Hire nie powiedział na ten temat ani słowa. Gazy wylatujące z otworu w rakiecie również nie napotykają na opór. Jednak de la Hire nie powiedział najważniejszego, a mianowicie, że w tym przypadku ciśnienie czy sprężystość ga-

¹¹ I. Newton, *Matematyczeskija naczata naturalnoj filosofii* (przekład rosyjski A. N. Kryłowa). *Sobranije trudow*, t. VII, 1936, s. 41.

¹² *Sur les effets du ressort de l'Air...*, jw. s. 11.

zów, działając w przeciwnych kierunkach wzdłuż osi przewodu nie porusza kuli ku wylotowi, jak to ma miejsce w dziale. Natomiast wyraził on inny, bardzo ważny pogląd w słowach: „Rakieta leci z tym większą prędkością, im większą prędkość posiada płonąca substancja u wylotu skierowanego w dół otworu”. W ten sposób po raz pierwszy została wypowiedziana myśl, wynikająca ogólnie mówiąc z równania zachowania pędu. De la Hire sformułował więc, wprawdzie tylko jakościowo, zależność między prędkością odrzutu i ruchu rakiety a prędkością kuli, w tym przypadku prędkością uchodzących z dyszy gazów. Tak więc dokonany został istotny krok w kierunku wyjaśnienia mechanizmu ruchu rakiety oraz ustalenia zależności między prędkościami i masami poruszających się części, znanej jako prawo zachowania pędu.

Tezy de la Hire'a nie zostały zapomniane, zwłaszcza przez tych uczonych, którzy interesowali się historią rakiet, w szczególności rozwojem teorii ich ruchu. Rozważania jego znalazły odbicie w pracy Montgéry'ego¹³ z 1815 r. Jednakże Montgéry ograniczył się tylko do wzmianki o teorii de la Hire'a i określił ją, podobnie jak i twierdzenia Buffona — o których niżej — jako sformułowane jedynie ogólnie.

W inny sposób starał się wyjaśnić pochodzenie siły odrzutu w latach 1715 i 1741 Frézier. Pominał on zupełnie badanie odrzutu działa, co niewątpliwie zawęziło jego tok rozumowania. Dlatego Frézier, chociaż współczesny de la Hire'owi, za przyczynę ruchu rakiety czy powstawania siły odrzutu uważał zupełnie co innego: „...jeśli dysza skierowana jest w dół, płomień w wyniku takiego położenia zdąża ku dołowi, a napotykając na opór powietrza, zmuszony jest cofnąć się ku górze. W ten sposób płomień zmusza raketę do wznoszenia się wskutek ciągłego odpychania, wywołanego sprężystością powietrza”¹⁴.

Frézier pisze zupełnie jednoznacznie, że jedyną przyczyną wznoszenia się rakiety jest działanie gazów wylatujących z jej otworu na otaczające powietrze. Ześrodkowywał on przy tym uwagę czytelnika na sprężystość powietrza. Koncepcja Fréziera nie wyjaśniała przyczyny, dzięki której raketa może poruszać się w próżni. Była ona znacznie dalsza prawdy niż teoria de la Hire'a, miała jednak wielu zwolenników.

Koncepcję Fréziera poparli przede wszystkim fizycy o wielkich nazwiskach, ich wypowiedzi zyskały szeroki rozgłos i przyjęte zostały z większym zaufaniem niż poglądy de la Hire'a.

Już w 1717 r. jako pierwszy głos zabrał Mariotte. Krótko, bez żadnego uzasadnienia, a więc niezbyt przekonująco dla specjalistów,

¹³ Montgéry. *Traité des fusées du guerre, nommés autrefois rochettes et maintenant fusées à la Congreve*. Paris 1825, s. 82.

¹⁴ S. Frézier, *Traité des feux d'artifice*. Paris 1715, s. 123, La Hay 1741, s. 123.

ale za to kategorycznie oświadczył: „Latająca rakietą unosi się wskutek uderzenia jej płomieni o powietrze. Jeśli jednak jest zbyt ciężka, to wznieść się nie może”¹⁵.

Znacznie dokładniej teorię ruchu rakiety naświetlił Buffon w 1740 r., wprawdzie w tym samym duchu co i Mariotte, jego poglądy jednak zawierały również i racjonalne tezy. Znał on punkt widzenia de la Hire'a i wspominał o jego teorii zreferowanej w *Historii Akademii* z 1702 r. Buffon zaczął, podobnie jak Frézier, od rozpatrzenia przyczyn powodujących ruch rakiety. Za punkt wyjścia posłużyło mu słuszne stwierdzenie, że gazy powstające w komorze rakiety zmieszane z powietrzem i dysponujące dużą siłą usiłują rozprężyć się i działają w jednaki sposób we wszystkich kierunkach. „Powietrze może dokonać tego, tzn. wprawić w ruch rakiety — pisał Buffon — tylko przez otwartą, dolną część rakiety, skąd uchodzi płonąca substancja razem z powietrzem, które ją wypycha. Lecz jednocześnie działa ono z taką samą siłą na górną, zamkniętą część rakiety”.

Dalej jednak jest mowa o czynnikach, które nie mogą grać żadnej roli w wytwarzaniu siły odrzutu, zwłaszcza w raketach prochowych z połowy XVIII w. Buffon sądził, że powietrze z rakiety działa, napierając na otaczające powietrze, znajdujące się pod dolną częścią, ponieważ powietrze to nie może mu dostatecznie szybko ulec wskutek wielkiej prędkości płomienia”. Następnie znów wszystko jest poprawnie: „W ten sposób przednia część rakiety porusza się do góry i wznosi z wielką prędkością”¹⁶.

Tak więc Buffon był wprawdzie zwolennikiem koncepcji Fréziera i Mariotte'a, jednak wypowiedział się bardziej jasno, a jego błędny wywód opierał się na dostatecznie uzasadnionych przesłankach.

W tym samym mniej więcej duchu jak Frézier, Mariotte i Buffon, wypowiedział się d'Antoni w 1765 r. Toteż Montgéry błędnie zaliczał go do tych uczonych, którzy negowali rolę powietrza w wytwarzaniu siły odrzutu¹⁷.

D'Antoni był wielce doświadczonym artylerzystą. Łatwo mógł przy rozpatrywaniu ruchu rakiety wyjść z na pewno dobrze mu znanego zjawiska odrzutu. Jednak d'Antoni chociaż formalnie mówił o odrzucie, nie wiązał go z mechanizmem ruchu rakiety. Rozważał on wpływ sprężystego fluidu z naczynia i próbował wyjaśnić przyczynę przemieszczania się tego ostatniego w kierunku przeciwnym, „z siłą odpowiadającą gęstości i prędkości tego fluidu”. Zwracał więc uwagę, podobnie jak

¹⁵ E. Mariotte, *De l'équilibre des corps fluides. Oeuvres*, t. XI. Leide 1717, s. 392.

¹⁶ *Sur les Fusées volaires. Histoire de l'Académie des Sciences de Paris 1740*, s. 105.

¹⁷ Montgéry, *iw.*, s. 83—84.

i de la Hire, na zależność ruchu rakiety od prędkości wpływu, ponieważ pod pojęciem naczynia czy zbiornika na pewno miał na myśli ten typ pocisku. Wylatujący z otworu strumień gazów odrzucał — według d'Antoniego — znajdujące się z tyłu powietrze: „Ponieważ otaczające zbiornik powietrze nie przylega do niego dostatecznie silnie, wylatujący sprężysty fluid, pokonując opór powietrza, odrzuca je w stronę przeciwną kierunkowi przemieszczania się zbiornika. I jeśli ciężar zbiornika zostanie pokonany siłą tegoż fluidu, to zostanie on wprowadzony w ruch”. Po dalszym mglistym zdaniu, nie rzucając nowego światła na rozpatrywane zjawisko, d'Antoni wnioskuje: „W ten sposób sprężysty fluid, którego prędkość jest znacznie większa niż prędkość odrzucanego ciała, powinien napotykać na silniejszy opór powietrza”¹⁸.

Zwolennicy koncepcji, wyjaśniającej ruch rakiety działaniem gazów wylatujących z dyszy na otaczające powietrze, uzasadniali ją coraz mniej przekonywająco. Wywody d'Antoniego pełne są niedopowiedzeń i niejasności. Poglądy jednak uczonych podzielających jego punkt widzenia zgodne były w tym, że wraz ze zwiększaniem prędkości wylatujących gazów wzrasta prędkość rakiety.

Kierunek Fréziera, Mariotte'a, Buffona i d'Antoniego znalazł kontynuatorów również w pierwszej połowie wieku XIX. Należeli do nich Ruggieri¹⁹ oraz Favé²⁰, którzy rozpatrując ruch rakiety Marka Greka opierali się na twierdzeniach Fréziera, Buffona i innych.

W obronie poglądów de la Hire'a jako jeden z pierwszych wystąpił Desaguliers; jego teoria została dobrze zrozumiana przez Montgéry'ego²¹. W 1751 r. Desaguliers²² nakreślił obraz powstawania siły odrzutu, do którego w przyszłości często nawiązywali inni uczeni. Jeśli kadłub rakiety jest dostatecznie wytrzymały i nie posiada otworu, przez który mogłyby uchodzić produkty spalania, rakietą nie uniesie się. W tym przypadku siły powstające w wyniku nacisku gazów prochowych na przednią i tylną część rakiety równoważą się. Gdyby jednak gazy miały możliwość wydostać się przez otwór w tylnej części rakiety, ciśnienie działające na przednią część nie byłoby niczym równoważone i rakietą poruszałyby się w kierunku przeciwnym strumieniowi gazów.

Wyjaśnienie podane przez Desaguliensa, tak jak i badania jego prekursorów — przeciwników teorii „odpychania” rakiety od powietrza —

¹⁸ P. d'Antoni, *Examen de la poudre*. Paris 1765, 1773, s. 97—98.

¹⁹ C. Ruggieri, *Pyrotechnie militaire ou Traité complet des feux de guerre et des bouches à feu etc.* Paris 1812, s. 282.

²⁰ Reinaud et Favé, *Du feu grégeois, des feux de guerre et des origines de la poudre à canon*. Paris 1845, s. 81.

²¹ Montgéry, jw. s. 83—84.

²² J. T. Desaguliers, *Cours de physique experimentale*. Paris 1751, t. II, s. 265—266.

dobrze tłumaczyły charakter tylko jednej siły, będącej częścią całkowitej siły odrzutu rakiety. Była to jej składowa statyczna, wywołana różnicą ciśnień — atmosferycznego i panującego w wyjściowym przekroju dyszy. Jak wiadomo, dla rakiet prochowych składowa ta stanowi nieznaczną część (10—12%) całkowitej siły odrzutu. Do wykrycia zasadniczej — dynamicznej — składowej uczeni tego czasu zaledwie zbliżali się, chociaż trzecia zasada dynamiki Newtona dawno wskazywała im ku temu drogę. Wystarczyło zwrócić uwagę na twierdzenie o pędzie. Sporadyczne próby były czynione w tym kierunku i wcześniej, jednakże pierwszym istotnym krokiem naprzód okazała się wypowiedź d'Arcy'ego, który badał odrzut działa-wahadła przy strzelaniu kulą i bez niej.

Nie odrzucając całkowicie roli powietrza jako ośrodka, od którego odbija się lufa w czasie odrzutu przy strzelaniu bez kuli, d'Arcy zwracał uwagę na rolę przemieszczających się mas. Widział on główną przyczynę odrzutu „...w samej masie prochu: masa ta powinna swoją inercją przeciwdziałać i, zapaliwszy się, zachowywać jak sprężyna o pewnym ciężarze, która opierając się jednym końcem o jakieś ciało ruchome i rozprostowując się ruszy je na pewno z miejsca nawet wtedy, jeśli drugi jej koniec pozostaje przez cały czas swobodny”²³.

W ten sposób kolejny etap badania zjawiska odrzutu i ruchu rakiety zakończył się odkryciem zależności między masami poruszających się części a ich prędkościami.

Jeszcze dalej w tym kierunku poszedł Nollet w 1754 r. Za punkt wyjścia posłużyło mu — tak jak i de la Hire'owi — przedstawienie gazów rozszerzających się w przewodzie lufy jako rozluźniającej się sprężyny. Wnioskował on następująco: „Proch, który zapala się między częścią tylną lufy i kulą, należy rozpatrywać jako sprężynę, która, rozluźniając się w jedną i drugą stronę, nadaje obu ciałom prędkość, tym większą dla jednego ciała, im mniejsza jest jego masa w stosunku do drugiego. Dlatego działa czy muszkiet (zwłaszcza, jeśli wziąć pod uwagę przeszkody, które je zatrzymują) znacznie trudniej jest poruszyć niż kulę armatnią czy muszkietową. Łatwo też dojść, dlaczego zapalony proch nadaje kuli nierównie większą prędkość”²⁴.

Nollet wspominał więc wprawdzie o tym, co de la Hire uważał za główny czynnik wpływający na wielkość odrzutu, a mianowicie o roli oporu, na jaki napotyka działa przy odrzucie, jednak istotna była dla niego masa poruszających się części. Nollet zatem był już bardzo bliski wyjaśnienia prawa odrzutu, które wywodzi się, ogólnie biorąc, z równa-

²³ P. d'Arcy, *Mémoire sur la théorie de l'Artillerie. L'Histoire de l'Académie des Sciences de Paris 1751*, s. 10.

²⁴ Nollet, *Leçons de physique expérimentale*. Paris 1754, t. I, s. 360.

nia zachowania pędu. Ta sama zasada, wprawdzie ujęta tylko jakościowo, stanowi dla niego podstawę wyjaśnienia zjawiska ruchu rakiety. Niestety Nollet tylko wspominał o rozciągnięciu swoich tez na to zjawisko, bliżej się jednak nim nie zajął.

Wypowiedzi Nolleta nie były obce Montgéry'emu²⁵. Jednak i tutaj trzeba mu wytknąć nieścisłość, Montgéry bowiem błędnie uważał Nolleta za zwolennika koncepcji Fréziera, Buffona i innych.

W 1772 r. Bezout²⁶ podszedł do badania odrzutu działa z pozycji matematyki i mechaniki teoretycznej. Dało mu to możliwość otrzymania — w granicach przyjętych przez niego założeń — dostatecznie ścisłych rezultatów już o charakterze ilościowym. Bezout, podobnie jak i jego poprzednicy: de la Hire, Desaguliers i Nollet, uważał, że ciśnienie gazów prochowych działa w przewodzie lufy jednakowo we wszystkich kierunkach. Ciśnienie wywierane na ścianki lufy równoważone jest ich wytrzymałością, o ile są one dostatecznie mocne. Natomiast ciśnienie, działające na dno przewodu i na kulę, powoduje ich ruch w przeciwnych kierunkach. Prędkości lufy i kuli nie są jednakowe, gdyż ich masy są różne, co stwierdzał już Nollet.

Założenia Bezouta były przybliżone. Dopiero jednak znacznie później wykazano, że ciśnienie gazów prochowych w tylnej części lufy i w warstwie przylegającej do kuli nie jest jednakowe. Bezout nie uwzględniał również masy lotnych i stałych produktów wybuchu prochu, przemieszczających się wraz z lufą i kulą.

Na podstawie przyjętych założeń Bezout zestawiał równania pędu dla układu lufa-kula. Przyrównał on przyrosty pędu dla lufy i kuli do przyrostu popędu jednakowej siły P , działającej na oba te ciała, a zależnej od ciśnienia gazów prochowych:

$$m dv = P dt, \quad (1)$$

$$M dV = P dt, \quad (2)$$

gdzie: m i v — masa i prędkość kuli, M i V — masa i prędkość lufy. Po przyrównaniu lewych stron równań różniczkowych (1) i (2) i scałkowaniu otrzymanego w ten sposób wyrażenia, Bezout znalazł szukane równanie:

$$mv = MV, \quad (3)$$

przy czym stała całkowania w tym przypadku równa się zeru, ponieważ w warunkach początkowych, kiedy $t = 0$, prędkości $v = V = 0$.

²⁵ Montgéry, jw. s. 82—83.

²⁶ E. Bezout, *Cours à l'usage de l'Artillerie*. Paris 1772, t. IV, s. 80—88.

Dla określenia prędkości lufy i kuli Bezout ułożył jeszcze równanie sił żywych i rozwiązał je razem z równaniem zachowania pędu (3) w odniesieniu do szukanych prędkości v i V . Najistotniejsze jednak było wyprowadzone przez niego równanie zachowania pędu, które określa w sposób ilościowy zależność między przemieszczającymi się masami a ich prędkościami oraz wyjaśnia zasadę zjawiska odrzutu.

Bezout próbował również wyjaśnić przyczynę ruchu rakiety: „Odrzut przy strzelaniu tylko prochem należy przypisać uderzeniu sprężystego fluidu prochu i powietrza; tym też należy tłumaczyć wznoszenie się latających rakiet. Sprężysty fluid znajdujący się w rakiecie, rozprzestrzenia się z prędkością zależną od siły rozprężającej i od wielkości dyszy.

Sprężysty fluid napotyka na opór powietrza, spowodowany jego inercją; powoduje to działanie masy, którą fluid ten powinien wprowadzić w ruch i w efekcie — spowodować odrzut”²⁷.

Jak wynika z wszystkiego, co powiedziano dotychczas, prawidłowe pojmowanie istoty siły reakcji, chociażby w sposób jakościowy, wpływało ze słusznej interpretacji zjawiska odrzutu. Poglądy Bezouta również szły w tym kierunku. Tym niemniej popełni on błąd, próbując wyjaśnić przyczynę odrzutu działa przy strzelaniu tylko prochem oraz zasadę poruszania się rakiety. Istotę tego błędu nietrudno wykryć. W równaniu zachowania pędu (3) nie figuruje masa produktów wybuchowego spalania prochu czy chociażby masa ładunku. Dlatego, jeśli przyjąć brak kuli, tj. $m = 0$, otrzymamy prędkość odrzutu $V = 0$. Toteż Bezout, wychodząc z wyprowadzonego przez siebie równania, nie był w stanie wyjaśnić ani zasady odrzutu w przypadku strzelania tylko prochem, ani przyczyny ruchu rakiety. Był więc zmuszony zwrócić się do koncepcji uderzenia wylatujących gazów o powietrze.

W 1793 r. natomiast Lagrange²⁸ przyjął, że produkty spalania prochu przemieszczają się jednocześnie z lufą. Uważał on, że produkty te składają się z substancji lotnej i przyjmował, że ładunek prochu zamieniał się w całości w sprężysty gaz już przed poruszeniem pocisku. Lagrange zakładał, że jeśli odcięta pewnej warstwy gazu w momencie początkowym równa się x , to po upływie czasu t warstwa ta przesunie się, a jej odcięta będzie równa z , licząc od jakiegoś przyjętego, nieruchomego przekroju. Przy układaniu równań różniczkowych dla lufy, kuli i produktów lotnych Lagrange sądził przy tym, że ciśnienie zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do drogi, przebytej przez pocisk. Rozu-

²⁷ Tamże, s. 87.

²⁸ S. D. Poisson, *Formules relatives au mouvement du boulet dans l'intérieur du canon, extraits des manuscrits de Lagrange*. „Journal de l'Ecole Polytechnique”, t. XIII, cahier 21, 1832, s. 187—203.

mując, ogólnie biorąc, w ten sam sposób jak Bezout, Lagrange wypro-
wadził następujące równanie:

$$MV + mv + \frac{m'_0}{l_1} \int_0^{l_1} \frac{dz}{dt} \cdot dx = 0 \quad (4)$$

gdzie m'_0 — masa ładunku prochu.

Aby wyznaczyć zależność między masami a prędkościami porusza-
jących się części (czego Lagrange nie zrobił), przy strzelaniu bez kuli,
trzeba przyjąć jej masę za zerową: $m = 0$. Prócz tego prędkość roz-
prężania się gazów (lub prędkość ich wypływu w przypadku rakiety)
uznać można za wielkość stałą:

$$\frac{dz}{dt} = u = \text{const.}$$

W rezultacie równanie zachowania pędu (4) dla układu lufa-ładunek
prochu przybierze postać:

$$MV - m'_0 u = 0,$$

ponieważ

$$\int_0^{l_1} \frac{dz}{dt} \cdot dx = -ul_1$$

skąd

$$V = u \frac{m'_0}{M}. \quad (5)$$

Po przeanalizowaniu wzoru (5), mając na uwadze, że stosunek
 $\frac{m'_0}{M}$ ma „małą” wartość, okaże się, że wielkość $\frac{m'_0}{M}$ jest pierwszym
wyrazem rozwinięcia w szereg wyrażenia $\ln \left(1 + \frac{m'_0}{M} \right)$.

Oznacza to, że wzór (5) można napisać w następujący sposób:

$$V = u \ln \left(1 + \frac{m'_0}{M} \right)$$

Jest to wzór Ciołkowskiego dla chwili spalenia całego ładunku prochu.
Dla jakiegoś pośredniego momentu równanie będzie wyglądać nieco
inaczej:

$$V = u \ln \left(\frac{M + m'_0}{M + m'} \right)$$

gdzie m' — masa ładunku nie spalona jeszcze w chwili t . Przytoczony
wzór odpowiada różniczkowemu równaniu pędu

$$(M + m') dV = u dm'.$$

Równanie pędu wyprowadzone przez Lagrange'a i zastosowane do przypadku, gdy strzela się bez użycia kuli, oraz do ruchu rakiety, jest więc pierwszym przybliżeniem bardziej ogólnego równania, uwzględniającego zmienność poruszającej się masy, a więc zmniejszanie się masy ładunku lub produktów jego przeobrażenia w wyniku wyrzucania ich przez wylot lufy lub otwór rakiety.

Reasumując należy podkreślić, że fizyczny sens zjawiska odrzutu i ruchu rakiety oraz istota siły reakcji zostały wyjaśnione w momencie, gdy uczeni badający te zagadnienia sięgnęli do twierdzeń matematyki i mechaniki teoretycznej. Już więc w końcu XVIII w., po opracowaniu matematycznej strony zagadnienia, uczeni byli bliscy ustalenia zależności, jakiej podlega prędkość ruchu rakiety w przypadku, gdy działa na nią tylko siła odrzutu.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ВЫБРОСА ОРУДИЯ И ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ В ПОНЯТИИ УЧЕНЫХ XVII и XVIII СТОЛЕТИЙ

Представление о природе движения ракеты складывалось на протяжении нескольких веков и проходило на фоне борьбы двух различных точек зрения.

Первая, ошибочная, концепция основывалась на следующем: ракета перемещается вследствие того, что пороховые газы, выбрасываемые через отверстие в ее хвостовой части, отталкиваются от воздуха. Эту точку зрения поддерживали Фрезье, Мариотт, Бюффон, д'Антони. Несмотря на ложность этой теории, она находила приверженцев даже в начале XIX-го века.

Вторая концепция исходила из закона сохранения количества движения, который в качественной форме начал складываться еще до Ньютона. Первые высказывания, относящиеся к откату орудия принадлежали Риво де Флорансу и Местру. Затем, уже после Ньютона, но совершенно независимо от него, в этом же направлении сформулировали свои положения де Ла Ир и Дезагюлье. Наиболее близкое к действительности качественное объяснение отката орудия было дано д'Арси и Нолле, который верно представил и причины движения ракеты. Наконец, Безу и Лагранж, опираясь уже на третий закон Ньютона, получили математические выражения для отката ствола орудия, которые при определенных допущениях можно было распространить и на движение ракеты. Таким образом к концу XVIII-го века ученые близко подошли к известным в настоящее время формулам для скорости движения ракеты.

THE NATURE OF THE KICK OF A GUN AND OF THE MOTION OF A ROCKET AS SEEN BY SCIENTISTS OF THE XVII AND XVIII CENTURIES

The notion of the nature of rocket's motion has been developed gradually during several centuries and has been forming against the background of a struggle between two different points of view.

The first erroneous conception was based on the following: the rocket is moving because the powder gases that are thrust through the hole in its tail part are repulsed from the air. This point of view has been supported by Frézier,

Mariotte, Buffon, d'Antoni. The falsity of this theory notwithstanding it has founds its adherents as late as the first half of the XIX century.

The other conception was based on the law of motion preservation, which in its qualitative form has been successively formulated even prior to Newton. The first observations relating to the gun's kick were reported by Rivault de Florence and Mestre. Later, already after Newton but quite independently from him, de la Hire and Desaguliers have formulated their theses in the same direction. The nearest to truth, a qualitative explanation of the gun's kick, has been given by d'Arcy and Nollet, who also was the first to give correctly the causes of rocket's motion. Finally Bezout and Lagrange, taking as base the third principle of Newton, arrived at mathematical formulae for the kick of gun's barrel, which at certain definite conditions could be applied also to the motion of a rocket.

In such a way at the end of the XVIII century scientists arrived quite near to the well known at present formulae for the velocity of rocket's motion.