



St. WÓJCICKI

**S I L N I K I**  
pulsacyjne  
strumieniowe  
rakietowe

# ERRATA

do książki: St. W ó j c i c k i – Silniki pulsacyjne, strumieniowe, raketowe

Str.	Wiersz		Jest	Powinno być
	od góry	od dołu		
140	12	—	... $10^{-3} T_s$	... $10^{-3} T_s$
244	3 i 4	—	... 3,6 kG/kGgodz <sup>2</sup> ...	... 3,6 kG/kGgodz...
284	4	—	... 4 na 3/4 promienia...	..., na 3/4 promienia, 4...

STANISŁAW WÓJCICKI

# SILNIKI

pulsacyjne  
strumieniowe  
rakietyowe

---



WYDAWNICTWO  
MINISTERSTWA OBRONY NARODOWEJ

1962

Opiniodawca:  
Prof. dr inż. RYSZARD SZYMANIK

Redaktor  
Inż. JERZY DOMAŃSKI



W książce omówiono problemy teoretyczne, konstrukcyjne i badawcze silników: pulsacyjnego, strumieniowego i raketowego; podano zasady obliczania i projektowania tych silników; przeprowadzono szczegółową analizę procesów elementarnych zachodzących w tych silnikach oraz uwypatniono zasadnicze kierunki ich rozwoju.

Książka jest przeznaczona dla inżynierów interesujących się techniką lotniczą i raketową. Może ona być również pomocą naukową dla studentów niektórych wydziałów mechanicznych wyższych uczelni technicznych.

5197

5245-8

Redaktor techn.: Helena Malczewska  
Korektor: Janina Staniewicz  
Okładkę projektował: Jerzy Kępkiewicz

Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej  
Warszawa 1962. Wydanie I.  
Printed in Poland

Nakład 1500 egz. Obj.: 20.36 ark. wyd., 18.75 ark. druk. Papier: ilustr. V kl. 70 g. Format: 61 x 88/16 z Zakładów Celulozowo-Papierniczych im. J. Marchlewskiego we Włocławku. Oddano do składu 9.X.1961 r. Podpisano do druku w kwietniu. Druk ukończono w maju 1962 r. Zam. 10474 z dnia 7.X.1961 r. Wojsk. Zakłady Graficzne w Warszawie ul. Grzybowska 77. Cena zł 35,— H-64.



## PRZEDMOWA

Omówione w tej książce silniki: pulsacyjny, strumieniowy i raketowy, stanowią o przyszłości lotnictwa oraz o stanie obecnym i rozwoju techniki raketowej i astronautyki. Jest to główną przyczyną ich stale rosnącego znaczenia w świecie współczesnym.

W książce podjęto pierwszą próbę syntetycznego ujęcia zagadnień tych silników, i to w stosunkowo szerokim zakresie — teorii, konstrukcji i badań jako czynników nierozłącznych i jednakowo ważnych w procesie tworzenia silnika.

Takie ujęcie było następstwem przekonania o istnieniu dużego podobieństwa zagadnień teoretycznych i technologicznych dotyczących tych silników. Mają one wspólną bardzo istotną cechę decydującą o ich ciągłym rozwoju: prosty, oparty tylko na jednym kierunku ruchu sposób zamiany energii cieplnej w kinetyczną energię strumienia wytwarzającego ciąg.

W książce przeanalizowano procesy elementarne występujące niezależnie w każdym z opisywanych silników, scharakteryzowano indywidualne cechy każdego silnika oraz przedstawiono wspólne dla tych silników zespoły z uwzględnieniem metody ich konstruowania i badania.

Taki układ wynikał wprost z przyjętego sposobu traktowania omawianych silników jako pewnej syntetycznej całości.

Ostatecznym przeznaczeniem silników pulsacyjnych, strumieniowych i raketowych, stanowiących obecnie szczytowe osiągnięcie w rozwoju urządzeń cieplnych, jest realizacja dwu często antagonistycznie pojmowanych idei: idei podróży kosmicznej oraz idei prostego i ekonomicznego napędu w lotnictwie klasycznym. Autor jest przekonany, że idee te, inspirowane się wzajemnie i uzupełniając, będą urzeczywistniane przynajmniej w najbliższych dziesięcioleciach równoległe i z równym mniej więcej nakładem inwencji twórczej konstruktorów oraz naukowców.

Redakcji Książek Technicznych Wydawnictwa MON jestem bardzo wdzięczny za podjęcie decyzji wydania tej książki. Ewentualne jej formalne zalety są zasługą redaktora inż. Jerzego Domańskiego, za co Mu serdecznie dziękuję.

STANISŁAW WÓJCICKI

Warszawa 1961

# SPIS TREŚCI

Przedmowa . . . . .	5
Ważniejsze oznaczenia . . . . .	8
<b>1. Analiza pracy silników</b> . . . . .	9
1.1 Zasada działania silnika pulsacyjnego . . . . .	9
1.2 Zasada działania silnika strumieniowego . . . . .	10
1.3 Zasada działania silników rakietowych . . . . .	11
1.4 Ciąg silników odrzutowych . . . . .	13
1.5 Moc i sprawność napędu . . . . .	15
1.6 Sprawność cieplna i ogólna silników lotniczych . . . . .	17
1.7 Charakterystyki prędkościowe silników lotniczych . . . . .	18
1.8 Dynamika rozwoju silników odrzutowych — krótka historia silników pulsacyjnych, strumieniowych i rakietowych . . . . .	20
Literatura . . . . .	22
<b>2. Wielkości charakteryzujące silniki</b> . . . . .	23
Literatura . . . . .	26
<b>3. Zagadnienia przepływu przez silniki</b> . . . . .	27
3.1. Przepływy turbulentne . . . . .	27
3.2. Dyfuzory . . . . .	30
3.3. Dysze . . . . .	50
3.4. Teoria eżektora gazowego . . . . .	58
3.5. Przepływy z doprowadzeniem ciepła . . . . .	63
Literatura . . . . .	68
<b>4. Źródła energii</b> . . . . .	69
4.1. Materiały pędne . . . . .	69
4.2. Wolne rodniki . . . . .	88
4.3. Energia jądrowa . . . . .	89
Literatura . . . . .	93
<b>5. Tworzenie mieszanki</b> . . . . .	94
5.1. Wtryskiwacze . . . . .	94
5.2. Rozpylanie cieczy . . . . .	99
5.3. Widmo rozpylania . . . . .	102
5.4. Parowanie kropeł cieczy w ośrodku gazowym . . . . .	103
5.5. Mieszanie się strumieni rozpylonego paliwa i powietrza . . . . .	107
Literatura . . . . .	112
<b>6. Teoria spalania</b> . . . . .	113
6.1. Kinetyka chemiczna spalania . . . . .	113
6.2. Spalanie jednorodnych mieszanek w strumieniu laminarnym . . . . .	115
6.3. Spalanie jednorodnych mieszanek w strumieniu turbulentnym . . . . .	119
6.4. Ustalenie płomienia . . . . .	121

6.5.	Spalanie dyfuzyjne . . . . .	126
6.6.	Teoria palenia się rakietowych stałych materiałów pędnych . . . . .	134
Literatura . . . . .		141
<b>7. Silniki pulsacyjne</b> . . . . .		142
7.1.	Teoria falowa silnika pulsacyjnego . . . . .	143
7.2.	Nieustalony przepływ gazu w silniku pulsacyjnym . . . . .	144
7.3.	Analiza pracy silnika pulsacyjnego na podstawie metody charakterystyk . . . . .	147
7.4.	Tworzenie mieszanki, zapłon i przebieg spalania w silniku pulsacyjnym . . . . .	149
7.5.	Silniki bezzaworowe . . . . .	152
7.6.	Charakterystyki silników pulsacyjnych . . . . .	155
7.7.	Ciąg silnika pulsacyjnego . . . . .	159
7.8.	Obliczanie charakterystycznych wymiarów silnika . . . . .	161
7.9.	Rozwiązania konstrukcyjne silników pulsacyjnych . . . . .	162
7.10.	Pulsacyjny silnik detonacyjny . . . . .	164
7.11.	Zastosowanie silników pulsacyjnych . . . . .	167
Literatura . . . . .		169
<b>8. Silniki strumieniowe</b> . . . . .		170
8.1.	Termodynamika i aerodynamika silników strumieniowych . . . . .	170
8.2.	Komory spalania silników strumieniowych . . . . .	180
8.3.	Pulsacje w komorze silnika strumieniowego . . . . .	189
8.4.	Poddźwiękowe silniki strumieniowe . . . . .	191
8.5.	Naddźwiękowe silniki strumieniowe . . . . .	194
8.6.	Hiperdźwiękowe silniki strumieniowe . . . . .	203
8.7.	Silniki strumieniowe na paliwo stałe . . . . .	207
Literatura . . . . .		208
<b>9. Silniki rakietowe</b> . . . . .		209
9.1.	Termodynamika silników rakietowych . . . . .	209
9.2.	Silniki rakietowe na stały materiał pędny . . . . .	216
9.3.	Silniki rakietowe na ciekły materiał pędny . . . . .	231
9.4.	Silniki rakietowe o niechemicznym źródle energii . . . . .	242
Literatura . . . . .		248
<b>10. Silniki zespolone</b> . . . . .		249
10.1.	Połączenie silnika turbinowo-odrzutowego z silnikiem strumieniowym . . . . .	249
10.2.	Tunelowanie silników pulsacyjnych i rakietowych . . . . .	251
Literatura . . . . .		253
<b>11. Chłodzenie silników</b> . . . . .		254
11.1.	Przenikanie ciepła przez ściankę . . . . .	255
11.2.	Wymiana ciepła między spalinami i ścianką w warunkach nieustalonych . . . . .	260
11.3.	Wymiana ciepła przez promieniowanie . . . . .	261
11.4.	Złożona wymiana ciepła . . . . .	263
Literatura . . . . .		263
<b>12. Zasilanie silników</b> . . . . .		264
12.1.	Cięśnieniowy system zasilania . . . . .	265
12.2.	Przetłaczający system zasilania . . . . .	267
Literatura . . . . .		272
<b>13. Zasady konstruowania silników</b> . . . . .		273
Literatura . . . . .		280
<b>14. Badanie silników</b> . . . . .		281
14.1.	Ogólne zasady prowadzenia badań rozwojowych . . . . .	281
14.2.	Zasady modelowania silników . . . . .	284
14.3.	Stanowiska prób . . . . .	290
Literatura . . . . .		294
Załączniki . . . . .		295



## WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

$p$ [kG/cm <sup>2</sup> ]	— ciśnienie statyczne
$p^*$ [kG/cm <sup>2</sup> ]	— ciśnienie całkowite
$T$ [°K]	— temperatura statyczna
$T^*$ [°K]	— temperatura całkowita
$\gamma$ [kG/m <sup>3</sup> ]	— ciężar właściwy
$g$ [m/sek <sup>2</sup> ]	— przyśpieszenie ziemskie
$\rho$ [kG sek <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]	— gęstość
$G$ [kG/sek]	— wydatek
$S$ [kG]	— ciąg
$J$ [sek]	— impuls
$Hu$ [kcal/kG]	— wartość opałowa odniesiona do 1 kG mieszanki palnej
$Wu$ [kcal/kG]	— wartość opałowa odniesiona do 1 kG paliwa
$B$ [kG/godz]	— wydatek materiału pędnego
$b$ [kG/kGgodz]	— jednostkowe zużycie materiału pędnego
$a$	— współczynnik nadmiaru powietrza
$f$	— stosunek paliwa do utleniacza
$F$ [m <sup>2</sup> ]	— powierzchnia
$w$ [m/sek]	— prędkość
$a$ [m/sek]	— prędkość dźwięku
$M$	— liczba Macha
$s$ [kcal/kG°K]	— entropia
$i$ [kcal/kG]	— entalpia