

STANISŁAW WÓJCICKI

# SPALANIE

STANISŁAW WÓJCICKI

# SPALANIE



NT

WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE WARSZAWA

Opiniodawca  
*prof. dr inż. Bogumił Staniszewski*

Redaktor naukowy WNT  
*mgr inż. Józef Kulig*

Redaktor techniczny  
*Iwona Czarnecka*

Okładkę projektowała  
*Anna Kaszewska*

536.46

Książka jest zwartą monografią, obejmującą ogół zagadnień związanych z przebiegiem procesów spalania. Jej istotną część stanowi teoria palenisk i komór spalania: kotłów parowych, pieców przemysłowych, turbin i silników spalinowych.

Książka jest przeznaczona dla inżynierów zatrudnionych przy projektowaniu, badaniu i eksploatacji urządzeń, w których zachodzi spalanie oraz fizyków badających zjawiska podstawowe występujące w spalaniu. Będzie ona także pomocą dla słuchaczy wyższych uczelni technicznych.

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Printed in Poland



WNT, Warszawa 1969. Wydanie I, Nakład 2200 egz. Ark. wyd. 35,8. Ark. druk. 26,25 (34,91/A). Format B-5. Papier druk. mat. kl. III 70 g. Rękopis oddano do składania 2. IV. 1969. Podpisano do druku we wrześniu 1969. Druk ukończono we wrześniu 1969. Symbol 77341/To Cena zł 62,—

Pozn. Zakł. Graf. im. M. K. — Poznań Zam. 877/69 — G-2/924

*Stanisław Wójcicki*

*Spalanie*

BŁĘDY DOSTRZEŻONE W DRUKU

Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
68	2 kol. 3 rubr. od góry	$0,8624 \cdot 10^{-2}$	$0,8624 \cdot 10^{-20}$
68	6 kolumna 3 rubr. od góry	$0,8416 \cdot 20^{-23}$	$0,8426 \cdot 20^{-23}$
249	9 od dołu	$\varrho \text{ —}$	$w_m \text{ —}$
	11     "	$w_m \text{ —}$	$\varrho \text{ —}$



# SPIS TREŚCI

<b>Przedmowa</b>	7
<b>1. Wiadomości ogólne</b>	9
1.1. Opis typowych urządzeń, w których zachodzą procesy spalania	9
1.2. Historia i literatura przedmiotu	36
1.3. Charakterystyczne cechy i klasyfikacja procesów spalania	39
1.4. Podstawowe charakterystyki komór spalania	45
<b>2. Termodynamika spalania</b>	54
2.1. Własności paliw i mieszanek palnych	54
2.2. Analiza egzergetyczna procesów spalania	88
<b>3. Aerodynamika komór spalania</b>	98
3.1. Swobodna struga izotermiczna	98
3.2. Swobodna struga nieizotermiczna	102
3.3. Struga w nieograniczonym ośrodku poruszającym się współosiowo	104
3.4. Struga w nieograniczonym ośrodku przemieszczającym się pod kątem do jej osi	108
3.5. Układ strug poprzecznych w ograniczonej przestrzeni	110
3.6. Przepływ w kanale za ciałem o kształcie nieopływowym	111
3.7. Struga zawirowana w przestrzeni nieograniczonej	113
3.8. Struga zawirowana w przestrzeni ograniczonej	116
3.9. Charakterystyczne cechy przepływu turbulentnego	124
<b>4. Tworzenie mieszanki palnej</b>	143
4.1. Zjawisko dyfuzji w procesie tworzenia mieszanki palnej	143
4.2. Rozpylanie cieczy	151
4.3. Zasilanie komór spalania i palenisk paliwem stałym	187
4.4. Rozkład rozpylanej cieczy po wyjściu z rozpylacza	200
4.5. Balistyka niepracujących kropeł oraz cząstek paliwa stałego w ośrodku gazowym	203
4.6. Parowanie kropeł cieczy w ośrodku gazowym	209
4.7. Określenie pola koncentracji mieszanki paliwa i powietrza w komorze spalania	216
<b>5. Teoria zapłonu</b>	221
5.1. Uwagi o przebiegu reakcji chemicznych	221
5.2. Teoria cieplna samozapłonu	222
5.3. Teoria łańcuchowa samozapłonu	227
5.4. Samozapłon mieszanki w przepływie	229
5.5. Samozapłon paliwa stałego	231
5.6. Zapłon wymuszony	232
5.7. Granice zapłonu	236
5.8. Gaszące oddziaływanie ścianki na płomień	238
<b>6. Gazodynamika spalania</b>	241
6.1. Krzywa Rankina-Hugoniota	241
6.2. Normalna prędkość spalania	249
6.3. Turbulentne spalanie mieszanki jednorodnej	259

6.4. Przejście spalania w detonację i struktura fali detonacyjnej . . . . .	269
6.5. Stabilizacja płomienia . . . . .	275
6.6. Rozprzestrzenianie się płomienia w komorze spalania . . . . .	293
6.7. Spalanie pulsujące . . . . .	299
<b>7. Spalanie paliw gazowych . . . . .</b>	<b>316</b>
7.1. Kinetyka reakcji spalania paliw gazowych . . . . .	316
7.2. Spalanie dyfuzyjne . . . . .	319
7.3. Spalanie kinetyczne . . . . .	324
7.4. Spalanie bezpłomieniowe . . . . .	330
7.5. Spalanie kinetyczno-dyfuzyjne . . . . .	332
7.6. Spalanie paliwa gazowego z niedomiarem utleniacza . . . . .	334
7.7. Promieniowanie ciepłe płomienia gazowego . . . . .	336
7.8. Spalanie w spalinowych silnikach tłokowych z zapłonem iskrowym . . . . .	337
7.9. Spalanie paliw gazowych w paleniskach kotłowych . . . . .	342
7.10. Jonizacja płomieni i spalin . . . . .	346
<b>8. Spalanie paliw ciekłych . . . . .</b>	<b>348</b>
8.1. Przebieg spalania paliw ciekłych . . . . .	348
8.2. Spalanie paliw ciekłych na swobodnej powierzchni . . . . .	349
8.3. Spalanie pojedynczej kropli paliwa ciekłego . . . . .	350
8.4. Spalanie paliwa rozpylonego w powietrzu . . . . .	355
8.5. Charakterystyczne cechy spalania olejów opałowych . . . . .	359
8.6. Zapłon mieszanki rozpylonego paliwa ciekłego w powietrzu za pomocą iskry elektrycznej . . . . .	361
8.7. Detonacja w mieszance dwufazowej . . . . .	362
8.8. Spalanie w spalinowym silniku tłokowym o zapłonie samoczynnym . . . . .	363
8.9. Komory spalania turbin spalinowych . . . . .	370
<b>9. Spalanie paliw stałych . . . . .</b>	<b>375</b>
9.1. Spalanie węgla naturalnego . . . . .	375
9.2. Spalanie stałych materiałów pędnych i wybuchowych . . . . .	397
9.3. Pożary . . . . .	406
<b>Zakończenie . . . . .</b>	<b>413</b>
<b>Literatura . . . . .</b>	<b>415</b>
<b>Skorowidz . . . . .</b>	<b>419</b>

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$p$	— ciśnienie
$\rho$	— gęstość
$v$	— objętość właściwa
$T$	— temperatura
$\alpha$	— współczynnik nadmiaru powietrza
$f$	— stosunek paliwa do utleniacza
$Q$	— objętościowe natężenie przepływu
$m$	— masowe natężenie przepływu
$B$	— zużycie paliwa
$L_t$	— teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania
$W_u$	— wartość opałowa paliwa
$W_t$	— ciepło spalania paliwa
$H_t$	— ciepło spalania mieszanki
$H_u$	— wartość opałowa mieszanki
$K$	— stała równowagi chemicznej
$w, u$	— prędkość przepływu
$q$	— strumień cieplny
$\delta$	— szerokość strefy reakcji
$R$	— stała gazowa
$D$	— współczynnik dyfuzji
$\tau$	— czas
$\psi$	— współczynnik strat aeromechanicznych
$\xi$	— współczynnik wywiązywania się ciepła
$F$	— pole powierzchni
$c_p$	— ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu
$\mu$	— masa molowa, współczynnik natężenia przepływu
$\eta$	— dynamiczny współczynnik lepkości
$A$	— stała geometryczna rozpylacza
$d$	— średnica
$Re$	— liczba Reynoldsa
$Nu$	— liczba Nusselta
$C_p H_p O_p S_s$	— udział masowy węgla, wodoru, tlenu i siarki w paliwie





## PRZEDMOWA

W książce przyjęto następujący układ treści. Najpierw opisuje się szereg mniej lub więcej złożonych procesów spalania zachodzących w różnych urządzeniach technicznych, stosowanych w rozmaitych gałęziach przemysłu. Następnie te złożone procesy analizuje się i rozkłada na coraz prostsze, dochodząc do zjawisk podstawowych. Zwraca się przy tym uwagę na istnienie podobieństwa tych zjawisk niezależnie od tego, w jakim urządzeniu one występują.

Pozostałe rozdziały książki są poświęcone opisowi prostych procesów. Aby nadawać im jednak cechy konkretności, stale nawiązuje się do przestrzeni, gdzie te procesy przebiegają, a więc do palenisk i komór spalania.

Książka jest przeznaczona dla inżynierów zajmujących się projektowaniem lub eksploatacją urządzeń, w których występuje spalanie. Przedstawia ona pewną metodę pomocną przy opanowywaniu wszelkich trudności technicznych związanych ze spalaniem. Metoda ta jest oparta na szczegółowej analizie występujących tam procesów. Zakłada się przy tym, że racjonalne projektowanie tak złożonych urządzeń jak te, gdzie zachodzi spalanie, nie może się odbywać bez równoczesnego prowadzenia prac badawczych.

W książce, poza pewnymi wyjątkami, przedstawiono poglądy powszechnie przyjęte. Dołączony na końcu książki spis literatury zawiera najbardziej znane dzieła z zakresu spalania.

W pracy przyjęto na ogół zapis wzorów wielkościowych, co umożliwia uniezależnienie się od układu jednostek miar. We wzorach, empirycznych tablicach i przykładach liczbowych stosowano dość konsekwentnie układ SI.

