

Spis treści

Od Redaktora	XII
Spis ważniejszych oznaczeń	XIII
1 Konstrukcja współczesnych kotłów energetycznych	1
<i>prof. dr hab. inż. Władysław Gajewski, dr inż. Monika Kosowska-Golachowska</i>	
1.1 Wprowadzenie	1
1.2 Klasyfikacja kotłów energetycznych	4
1.2.1 Kotły pyłowe	8
1.2.1.1 Przepływowy kocioł pyłowy BB 2400 na nadkrytyczne parametry pary	9
1.2.1.2 Przepływowy kocioł pyłowy BB 1345 na nadkrytyczne parametry pary	20
1.2.2 Kotły fluidyzacyjne	24
1.2.2.1 Kotły z pęcherzową warstwą fluidalną (PWF)	26
1.2.2.2 Kotły z cyrkulacyjną warstwą fluidalną (CWF)	28
1.2.2.3 Ciśnieniowe kotły fluidyzacyjne	49
1.3 Perspektywy rozwoju kotłów energetycznych	51
Literatura	58
2 Spalanie paliw	59
2.1 Charakterystyka paliw gazowych, ciekłych i stałych	59
<i>prof. dr hab. inż. Ryszard K. Wilk</i>	
2.1.1 Paliwa gazowe	60
2.1.2 Paliwa ciekłe	66
2.1.3 Paliwa stałe	72
2.2 Stechiometria procesów spalania paliw	82
<i>prof. dr hab. inż. Jerzy Tomeczek</i>	
2.2.1 Paliwa gazowe	83
2.2.2 Paliwa stałe i ciekłe	84
2.2.3 Skład spalin po całkowitym i zupełnym spalaniu paliwa	85
2.2.4 Spalanie niecałkowite i niezupełne	86
2.2.5 Ciepło spalania i wartość opałowa paliw	87
2.2.6 Obliczanie temperatury spalin	93
2.2.7 Przybliżone równania praktyczne	94

2.3	Spalanie w atmosferze wzbogaconej w tlen	97
	<i>prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak, dr inż. Tomasz Czakiert</i>	
2.4	Modelowanie procesów spalania	116
2.4.1	Kotły pyłowe	116
	<i>prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kordylewski</i>	
2.4.1.1	Spalanie w paleniskach pyłowych	116
2.4.1.2	Modelowanie fizyczne spalania pyłu węglowego	117
2.4.1.3	Modelowanie numeryczne spalania pyłu węglowego	119
2.4.2	Kotły fluidyzacyjne	134
	<i>prof. dr hab. inż. Władysław Gajewski, dr inż. Monika Kosowska-Golachowska</i>	
2.4.2.1	Specyfika spalania paliw stałych w kotłach fluidyzacyjnych	134
2.4.2.2	Dynamika grubych ziaren węgla w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej	138
2.4.2.3	Ewolucja składu frakcyjnego cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej w procesie spalania	140
2.4.2.4	Modelowanie spalania ziaren węgla w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej	152
Literatura		155
3	Obliczenia procesów przepływowo-ciepłnych	160
3.1	Przepływy jednofazowe	160
	<i>dr hab. inż. Dawid Taler</i>	
3.1.1	Równania zachowania masy, pędu i energii dla stanu nieustalonego	160
3.1.1.1	Równanie zachowania masy	160
3.1.1.2	Równanie zachowania pędu	162
3.1.1.3	Równanie zachowania energii	166
3.1.2	Równania zachowania masy, pędu i energii dla stanu ustalonego	170
3.1.3	Analiza równań zachowania masy, pędu i energii pod kątem ich zastosowania do modelowania matematycznego wymienników ciepła	171
3.1.3.1	Równanie zachowania masy	172
3.1.3.2	Równanie zachowania pędu	172
3.1.3.3	Równanie zachowania energii	173
3.1.4	Równanie bilansu energii dla ścianki	175
3.1.4.1	Ścianka cylindryczna o dużej grubości	175
3.1.4.2	Ścianka o skupionej pojemności cieplnej	178
3.2	Przepływy dwufazowe	180
	<i>dr hab. inż. Dariusz Mikieliewicz prof. dr hab. inż. Jarosław Mikieliewicz</i>	
3.2.1	Wprowadzenie i specyfika przepływów dwufazowych	180
3.2.2	Przepływy dwufazowe bez wymiany ciepła	183
3.2.2.1	Struktury przepływów	183
3.2.2.2	Kanały pionowe	183
3.2.2.3	Kanały poziome	185
3.2.2.4	Mapy przepływu	186
3.2.3	Przepływ dwufazowy z wymianą ciepła — pojęcia podstawowe	188
3.2.3.1	Jednowymiarowy, stacjonarny model przepływu dwufazowego	189
3.2.3.2	Modele stopnia zapełnienia oraz mnożnika dwufazowego	193
3.2.4	Przepływy dwufazowe z wrzeniem	197
3.2.4.1	Wrzenie w przepływie w kanałach o średnicach konwencjonalnych	197
3.2.4.2	Wrzenie w przepływie w minikanalach	204
3.2.4.3	Półempiryczny model wrzenia w przepływie	209

3.2.5	Kondensacja w przepływie	210
3.2.6	Niestabilności w przepływach dwufazowych	217
3.2.6.1	Stabilność przepływu w kanałach generatora pary przy małych prędkościach	218
3.2.6.2	Analiza charakterystyki hydraulicznej kanału rekuperatora parownika	218
3.2.7	Zakończenie	221
3.3	Komory spalania	222
3.3.1	Metody analityczne obliczania komór spalania kotłów <i>prof. dr hab. inż. Jan Taler</i>	222
3.3.2	Symulacja CFD komór spalania kotłów <i>prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kordylewski</i>	226
3.3.2.1	Symulacja procesów spalania w paleniskach pyłowych	226
3.3.2.2	Symulacja powstawania i redukcji emisji tlenków azotu w paleniskach pyłowych	240
3.4	Obliczenia przepływowo-ciepne ekranów kotłów <i>prof. dr hab. inż. Kazimierz Wójs, dr inż. Sławomir Grądziel, dr inż. Piotr Szulc</i>	243
3.4.1	Obliczenia przepływowo-ciepne ekranów kotłów z obiegiem naturalnym <i>dr inż. Sławomir Grądziel</i>	244
3.4.2	Niestabilność przepływu czynnika roboczego w kotłach <i>prof. dr hab. inż. Kazimierz Wójs, dr inż. Piotr Szulc</i>	254
3.4.2.1	Modelowanie zjawiska niestabilności przepływu w kotłach przepływowych	255
3.4.2.2	Przepływ fazy ciekłej w rurze parownika	260
3.4.2.3	Przepływ mieszaniny parowo-wodnej w rurze parownika	262
3.4.2.4	Przepływ pary wodnej w parowniku	264
3.4.2.5	Przykład zastosowania modelu opracowanego w pracach [3.53, 3.153, 3.154, 3.157] do obiektu rzeczywistego	264
3.4.2.6	Podsumowanie	272
3.5	Kotłowe wymienniki ciepła <i>dr hab. inż. Dawid Taler</i>	273
3.5.1	Ogólne zasady obliczania wymienników	273
3.5.1.1	Wymiennik współprądowy	274
3.5.1.2	Wymiennik przeciwprądowy	276
3.5.1.3	Jednorzędowy rurowy wymiennik ciepła o krzyżowym przepływie czynników	277
3.5.1.4	Krzyżowo-prądowy wymiennik ciepła	283
3.5.2	Metody obliczeń wymienników ciepła stosowane w praktyce inżynierskiej	287
3.5.2.1	Metoda oparta na średniej logarytmicznej różnicy temperatur	287
3.5.2.2	Obliczanie wymienników ciepła — metoda NTU	293
3.5.3	Przykłady obliczeniowe	302
3.6	Współczynnik przenikania ciepła dla rur gładkich i ożebrowanych	308
3.6.1	Wprowadzenie <i>dr hab. inż. Dawid Taler</i>	308
3.6.2	Współczynniki wnikania ciepła po stronie spalin	310
3.6.2.1	Konwekcyjne współczynniki wnikania ciepła <i>dr inż. Tomasz Sobota</i>	310
3.6.2.2	Radiacyjne współczynniki wnikania ciepła <i>prof. dr hab. inż. Jan Taler</i>	320
3.6.3	Współczynniki wnikania ciepła po stronie wody i pary <i>dr inż. Piotr Wais</i>	327
3.6.3.1	Wymuszona konwekcja w rurach — wprowadzenie	327

3.6.3.2	Wymiana ciepła w przepływie laminarnym	329
3.6.3.3	Wymiana ciepła w przepływie turbulentnym	333
3.6.3.4	Przebieg procesu wrzenia	335
3.6.3.5	Podsumowanie	340
3.6.4	Symulacja CFD kompaktowych wymienników ciepła	340
	<i>dr inż. Artur Cebula</i>	
3.6.4.1	Porównanie wyników obliczeń przepływowo-ciepłnych w wymiennikach o różnej konstrukcji	345
3.7	Eksperymentalne wyznaczanie średnich współczynników wnikania ciepła	351
	<i>dr inż. Tomasz Sobota</i>	
3.7.1	Graficzna metoda Wilsona	352
Literatura		360
4	Obliczenia wytrzymałościowe kotłów	367
	<i>dr hab. inż. Piotr Duda, prof. PK</i>	
4.1	Obliczanie naprężeń w elementach o prostych kształtach	367
4.2	Obliczenia naprężeń w elementach ciśnieniowych o złożonych kształtach	371
4.3	Obliczanie naprężeń w elementach ciśnieniowych o złożonych kształtach z uwzględnieniem pełzania	377
Literatura		384
5	Analiza pracy kotłów w warunkach nieustalonych	385
5.1	Rozruch i wyłączanie kotła z ruchu	385
	<i>dr hab. inż. Bohdan Węglowski, prof. PK</i>	
5.1.1	Przygotowanie kotła do uruchomienia	386
5.1.2	Uruchomienie kotła	387
5.1.3	Opis zjawisk zachodzących w kotle w warunkach nieustalonych	389
5.1.4	Rozruch i wyłączanie z ruchu kotła z obiegiem naturalnym	392
5.1.5	Rozruch i wyłączanie z ruchu kotła przepływowego	402
5.2	Obliczenia przepływowo-ciepłne	405
5.2.1	Dynamika parownika kotła	405
	<i>prof. dr hab. inż. Jan Taler, dr hab. inż. Dawid Taler, mgr inż. Piotr Harchut</i>	
5.2.1.1	Wprowadzenie	405
5.2.1.2	Zmiany ciśnienia i temperatury w parowniku w czasie nagrzewania	406
5.2.1.3	Bilans masy i energii dla parownika kotła	408
5.2.1.4	Strumień ciepła przejmowany w komorze paleniskowej	410
5.2.1.5	Wyniki obliczeń	412
5.2.1.6	Wnioski	414
5.2.2	Dynamika przegrzewaczy pary	415
	<i>dr hab. inż. Wiesław Zima, prof. PK</i>	
5.2.2.1	Model matematyczny przegrzewaczy pary	416
5.2.2.2	Weryfikacja eksperymentalna	424
5.2.2.3	Podsumowanie	434
5.3	Obliczenia ciepłno-wytrzymałościowe w warunkach nieustalonych	435
	<i>dr hab. inż. Piotr Duda, prof. PK</i>	
5.3.1	Naprężenia ciepłne w elementach o prostych kształtach	435
5.3.2	Naprężenia ciepłne w elementach o złożonych kształtach	439
Literatura		445

6	Monitorowanie eksploatacji kotłów	447
6.1	Monitorowanie ciepłno-przepływowych warunków pracy <i>prof. dr hab. inż. Jan Taler, dr hab. inż. Bohdan Węglowski, prof. PK, dr hab. inż. Piotr Duda, prof. PK, dr hab. inż. Wiesław Zima, prof. PK, dr inż. Sławomir Grądział, dr inż. Tomasz Sobota, dr inż. Artur Cebula, dr hab. inż. Dawid Taler</i>	447
6.2	Monitorowanie ciepłno-wytrzymałościowych warunków pracy <i>prof. dr hab. inż. Jan Taler, dr hab. inż. Piotr Duda, prof. PK, dr hab. inż. Bohdan Węglowski, prof. PK, dr hab. inż. Wiesław Zima, prof. PK, dr inż. Sławomir Grądział, dr inż. Tomasz Sobota, dr hab. inż. Dawid Taler, dr inż. Artur Cebula, mgr inż. Magdalena Jaremkiewicz</i>	467
6.2.1	Eksperymentalne wyznaczanie temperatury przepływającego czynnika w stanie nieustalonym <i>mgr inż. Magdalena Jaremkiewicz</i>	467
6.2.1.1	Wprowadzenie	468
6.2.1.2	Modele matematyczne termometrów	468
6.2.1.3	Czujnik o budowie złożonej	469
6.2.1.4	Wyznaczanie temperatury czynnika na podstawie przebiegów temperatury termometru	472
6.2.1.5	Wnioski	476
6.2.2	Ocena stopnia zużycia w wyniku pełzania i zmęczenia cieplnego	477
6.2.3	Identyfikacja rozkładu temperatury	481
6.2.4	Wyznaczanie naprężeń cieplnych i pochodzących od ciśnienia	490
6.3	Procesy zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych kotłów	499
6.3.1	Wprowadzenie <i>prof. dr hab. inż. Jerzy Tomeczek, prof. dr hab. inż. Marek Pronobis</i>	499
6.3.2	Rodzaje i własności osadów popiołowych <i>prof. dr hab. inż. Jerzy Tomeczek, kandydat prof. dr hab. inż. Marek Pronobis</i>	499
6.3.3	Procesy zanieczyszczania — podstawy fizykochemiczne i modelowanie	504
6.3.3.1	Transformacja substancji mineralnej w procesie spalania węgla <i>prof. dr hab. inż. Jerzy Tomeczek</i>	504
6.3.3.2	Mechanizm tworzenia się osadów wysokotemperaturowych (WT) na powierzchniach grzewczych kotłów <i>prof. dr hab. inż. Jerzy Tomeczek, prof. dr hab. inż. Marek Pronobis</i>	510
6.3.3.3	Powstawanie osadów średnitemperaturowych (ST) <i>prof. dr hab. inż. Marek Pronobis</i>	516
6.3.4	Żużłowanie ścian komory paleniskowej <i>prof. dr hab. inż. Marek Pronobis</i>	519
6.3.4.1	Mechanizm procesu	519
6.3.4.2	Wpływ własności paliwa	520
6.3.4.3	Wpływ parametrów fizycznych procesu	521
6.3.4.4	Wskaźniki określające skłonność węgla do żużłowania i zanieczyszczania powierzchni grzewczych	524
6.3.4.5	Wpływ współspalania paliw alternatywnych na proces żużłowania	527
6.3.5	Zanieczyszczanie popiołem przegrzewaczy pary i podgrzewaczy wody <i>prof. dr hab. inż. Marek Pronobis</i>	535
6.3.5.1	Zasady obliczania wpływu osadów na wymianę ciepła	535
6.3.5.2	Wpływ współspalania paliw alternatywnych na zanieczyszczenie powierzchni ogrzewalnych	537

6.3.6	Monitorowanie procesów zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych kotła	538
	<i>prof. dr hab. inż. Jan Taler, dr inż. Marcin Trojan, dr hab. inż. Dawid Taler</i>	
6.3.6.1	Dotychczasowy stan zagadnienia	538
6.3.6.2	Charakterystyka zużłowania ścian komory paleniskowej kotła i zanieczyszczania lotnym popiołem powierzchni rur przegrzewacza	541
6.3.6.3	Monitorowanie lokalnego stopnia zanieczyszczenia	546
6.3.6.4	Sprawność kotła	548
6.3.6.5	Model matematyczny parownika kotła	552
6.3.6.6	Wyznaczanie strumieni masy powietrza, spalin i paliwa	553
6.3.6.7	Ocena stopnia zanieczyszczenia ścian komory paleniskowej i przegrzewacza kotła	555
6.3.6.8	Wyznaczanie w trybie on-line parametrów charakteryzujących stopień zanieczyszczenia ścian komory paleniskowej kotła i rur przegrzewacza	557
6.3.6.9	Ocena lokalnego stopnia zanieczyszczenia ścian komory paleniskowej kotła za pomocą wstawek termometrycznych	563
6.4	Korozja powierzchni ogrzewalnych kotłów	566
	<i>prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kordylewski, prof. dr hab. inż. Marek Pronobis</i>	
6.4.1	Korozja wysokotemperaturowa	566
	<i>prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kordylewski</i>	
6.4.2	Korozja niskotemperaturowa	575
	<i>prof. dr hab. inż. Marek Pronobis</i>	
	Literatura	577
7	Optymalizacja nagrzewania i ochładzania grubościennych elementów kotłów	584
	<i>prof. dr hab. inż. Jan Taler, dr inż. Piotr Dzierwa, dr hab. inż. Dawid Taler</i>	
7.1	Wstęp	584
7.2	Optymalne zmiany temperatury czynnika z uwagi na naprężenia cieplne	591
7.2.1	Funkcja wpływu — odpowiedź elementu na wymuszenie jednostkowe temperaturą płynu	594
7.2.1.1	Funkcja wpływu dla elementu cylindrycznego	594
7.2.1.2	Funkcja wpływu dla elementu sferycznego	598
7.3	Optymalizacja procesu nagrzewania	601
7.3.1	Optymalne zmiany temperatury czynnika, gdy temperatura czynnika nie zależy od jego ciśnienia	601
7.3.2	Optymalne zmiany temperatury czynnika z uwagi na sumaryczne naprężenia na brzegu otworu w obszarze czynnika o temperaturze nasycenia	603
7.3.3	Porównanie z przepisami dotyczącymi kotłów	605
7.3.4	Przykłady obliczeniowe	608
7.4	Propozycja nowych przepisów służących do wyznaczania dopuszczalnych szybkości nagrzewania i ochładzania grubościennych elementów kotłów	611
7.4.1	Przykłady obliczeniowe	615
7.4.2	Propozycja sposobu wyznaczania zmian temperatury czynnika w czasie nagrzewania i ochładzania elementów ciśnieniowych nieosłabionych otworami	616
7.4.3	Propozycja sposobu wyznaczania zmian temperatury czynnika w czasie nagrzewania i ochładzania elementów ciśnieniowych osłabionych otworami	619
	Literatura	624
	Załącznik Z7	625
	Z7.1. Naczynia i rurociągi ciśnieniowe nieosłabione otworami	625

Z7.1.1. Zbiorniki i rurociągi cylindryczne nieosłabione otworami	625
Z7.1.2. Zbiorniki sferyczne nie osłabione otworami	628
Z7.2. Koncentracja naprężeń na brzegach otworów w naczyniach ciśnieniowych poddanych działaniu ciśnienia wewnętrznego	629
Z7.2.1. Zbiorniki i rurociągi cylindryczne osłabione otworami	629
Z7.2.2. Zbiorniki sferyczne osłabione otworami	634
Literatura do załącznika Z7	637
Summary	638
Skorowidz	650