

SPIS TREŚCI

Przedmowa	17
Podstawowe oznaczenia stosowane w inżynierii chemicznej i procesowej	19
1. MECHANIZMY WYMIANY CIEPŁA	29
Rys. 1. Ogólna klasyfikacja podstawowych mechanizmów wymiany ciepła	30
Rys. 2. Mechanizmy złożone wymiany ciepła	31
Rys. 3. Porównanie różnych skal temperaturowych	32
Rys. 4. Promieniowanie elektromagnetyczne	32
Rys. 5. Przepuszczalność izotermiczna ciała doskonale czarnego	33
Rys. 6. Prawo Fouriera dla przewodzenia ciepła	33
Rys. 7. Przewodzenie ciepła przez ścianę płaską	34
Rys. 8. Wpływ grubości ściany rury na powierzchnię wymiany ciepła	34
Rys. 9. Współczynniki przewodzenia ciepła dla ciał stałych	35
Rys. 10. Współczynniki przewodzenia ciepła dla cieczy	36
Rys. 11. Współczynniki przewodzenia ciepła dla gazów	36
Rys. 12. Przewodzenie ciepła	37
Rys. 13. Porównanie wymiany ciepła przy niskich i wysokich wartościach współczynnika przewodzenia ciepła	37
Rys. 14. Przewodzenie ciepła przez trójwarstwowy układ płaski	38
Rys. 15. Przewodzenie ciepła przez wielowarstwowy układ cylindryczny	38
Rys. 16. Przenikanie ciepła między dwoma płynami oddzielonymi płaską ścianą stałą ...	39
Rys. 17. Przenikanie ciepła między dwoma płynami oddzielonymi ścianą cylindryczną	39
Rys. 18. Metoda graficzna wyznaczania temperatur w układzie wielowarstwowym	40
Rys. 19. Warstwa graniczna dla przepływu płynu wzdłuż powierzchni płaskiej	41
Rys. 20. Warstwy graniczne w rurze	41
Rys. 21. Powierzchnia płaska: lokalne wartości grubości warstw granicznych, współczynnika oporu przepływu i liczby Nusselta	42
Rys. 22. Przepływ wzdłuż ciał o różnych kształtach	43
Rys. 23. Optyw poprzeczny cylindra	43
Rys. 24. Separacja warstw granicznych	43
Rys. 25. Schematyczne porównanie przepływu laminarnego i burzliwego w rurze	44
Rys. 26. Wpływ kierunku wymiany ciepła na rozkład prędkości w przepływie laminarnym w rurze	44
Rys. 27. Rozkład temperatur przy wlocie do rury	45
Rys. 28. Powstawanie termicznej warstwy granicznej w laminarnym przepływie w rurze ..	45

Rys. 29.	Zakresy wnikanie ciepła w przepływie wymuszonym, swobodnym i mieszanym w rurze poziomej	46
Rys. 30.	Zakresy wnikanie ciepła w przepływie wymuszonym, swobodnym i mieszanym w rurze pionowej	47
Rys. 31.	W pełni rozwinięty rozkład temperatur dla stałej temperatury ściany	48
Rys. 32.	W pełni rozwinięty rozkład temperatur dla stałej wartości strumienia cieplnego	48
Rys. 33.	Wnikanie ciepła w termicznym odcinku wlotowym w przepływie burzliwym ($Pr = 0,7$)	49
Rys. 34.	Związek między prędkością a spadkiem temperatury płynu grzejnego przepływającego burzliwie w rurze według Pannella	50
Rys. 35.	Schemat wnikanie ciepła w przepływie wymuszonym burzliwym płynu w rurze	50
Rys. 36.	Wpływ liczby Prandtla na liczbę Nusselta dla $Re = 10^4$ i stałych parametrów fizykochemicznych w średniej temperaturze czynnika, wynikający z równania McAdamsa	51
Rys. 37.	Wpływ liczby Prandtla na burzliwe wnikanie ciepła dla przepływu w rurze	52
Rys. 38.	Liczba Nusselta dla wnikanie ciepła w przepływie laminarnym w rurze	53
Rys. 39.	Współczynniki wnikanie ciepła w przepływie wymuszonym w rurze	53
Rys. 40.	Porównanie analogii wnikanie ciepła w przepływie burzliwym w rurze	54
Rys. 41.	Rodzaje konwekcji naturalnej	55
Rys. 42.	Konwekcja naturalna na powierzchni pionowej	55
Rys. 43.	Warstwa przyścienna i lokalny współczynnik wnikanie ciepła na płaskiej powierzchni pionowej w warunkach konwekcji naturalnej	56
Rys. 44.	Rozkład prędkości i temperatury w warunkach laminarnej konwekcji naturalnej wokół poziomego walca	57
Rys. 45.	Rozkład temperatury i warstwy przyściennej w warunkach konwekcji naturalnej między równoległymi powierzchniami pionowymi dla małych wartości liczby Rayleigha	58
Rys. 46.	Rozkład bezwymiarowej prędkości w warunkach konwekcji naturalnej między równoległymi powierzchniami pionowymi dla małych wartości liczby Rayleigha	59
Rys. 47.	Rozkład temperatury w warunkach konwekcji naturalnej między równoległymi powierzchniami pionowymi, gdy warstwy przyścienne nie schodzą się.....	59
Rys. 48.	Mechanizm wnikanie ciepła w burzliwym spływie grawitacyjnym cieczy po ścianie płaskiej	60
Rys. 49.	Zależność zmodyfikowanej liczby Nusselta od liczby Reynoldsa dla spływu filmowego cieczy wynikająca z teorii	60
Rys. 50.	Mechanizm skraplania pary	61

Rys. 51.	Spływ filmu kondensatu po powierzchni rur poziomych	61
Rys. 52.	Pęcherzyki pary na powierzchni grzejnej	62
Rys. 53.	Zmiana promienia pęcherzyka pary w czasie jego wzrostu	62
Rys. 54.	Wzrost pęcherzyków pary przy wysokich ciśnieniach	63
Rys. 55.	Zależność współczynnika wnikania ciepła i gęstości strumienia ciepłego w procesie wrzenia cieczy od różnicy temperatur dla $P = 10^5$ Pa	63
Rys. 56.	Wrzenie filmowe na powierzchni pionowej ściany płaskiej	64
2. WYMIENNIKI CIEPŁA		65
Rys. 57.	Kryteria stosowane w klasyfikacji wymienników ciepła	66
Rys. 58.	Układy wymiennik ciepła – proces wymiany ciepła	67
Rys. 59.	Zmiany temperatur w przepływie współprądowym w wymienniku ciepła typu „rura w rurze”	68
Rys. 60.	Zmiany temperatur w przepływie przeciwpłądowym w wymienniku ciepła typu „rura w rurze”	68
Rys. 61.	Przybliżone obrazy w przepływie przeciwpłądowym przy wzrastającej liczbie sekcji przestrzeni międzyrurowej	69
Rys. 62.	Zmiany temperatur w dwudrogowym wymienniku ciepła typu „rura w rurze”	69
Rys. 63.	Wykorzystanie symetrii w oznaczaniu układów strumień–temperatura	70
Rys. 64.	Płaszczowo-rurowy jednodrogowy wymiennik ciepła	70
Rys. 65.	Układy rurek w wymienniku płaszczowo-rurowym	71
Rys. 66.	Płaszczowo-rurowe wymienniki ciepła produkcji Zakładów Urządzeń Przemysłowych w Nysie	72
Rys. 67.	Wnętrze płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła produkcji Zakładów Urządzeń Przemysłowych w Nysie	73
Rys. 68.	Wymiennik ciepła chłodzony powietrzem z rurami ożebrowanymi produkcji Zakładów Urządzeń Przemysłowych w Nysie	73
Rys. 69.	Wnętrze płaszczowo-rurowych wymienników ciepła z przegrodami helikoidalnymi produkcji Zakładów Urządzeń Przemysłowych w Nysie wykonywanych na licencji APP Lummus Heat Transfer	74
Rys. 70.	Porównanie przepływu w przestrzeni międzyrurowej płaszczowo-rurowych wymenników ciepła produkcji Zakładów Urządzeń Przemysłowych w Nysie wykonywanych na licencji APP Lummus Heat Transfer	75
Rys. 71.	Porównanie współczynników wnikania ciepła w przestrzeni międzyrurowej płaszczowo-rurowych wymienników ciepła produkcji Zakładów Urządzeń Przemysłowych w Nysie wykonywanych na licencji APP Lummus Heat Transfer	76
Rys. 72.	Geometria uporządkowanego przepływu poprzecznego względem rurek ...	76
Rys. 73.	Konfiguracja krzyżowych przepływów w wymiennikach ciepła	77
Rys. 74.	Rozkłady temperatur w krzyżowych wymiennikach ciepła	77

Rys. 75.	Poprawka temperaturowa ε dla dwudrogowego wymiennika płaszczowo-rurowego	78
Rys. 76.	Poprawka temperaturowa ε dla dwusekcyjnego wymiennika płaszczowo-rurowego	78
Rys. 77.	Poprawka temperaturowa ε dla czterosekcyjnego wymiennika płaszczowo-rurowego	79
Rys. 78.	Poprawka temperaturowa ε dla sześćosekcyjnego wymiennika płaszczowo-rurowego	79
Rys. 79.	Poprawka temperaturowa ε dla wymiennika krzyżowego z dwoma nie mieszanymi strumieniami	80
Rys. 80.	Poprawka temperaturowa ε dla wymiennika z przepływem poprzecznym, w którym strumień rurowy przepływa w szeregu U-rur, natomiast drugi czynnik płynie mieszanym przepływem poprzecznie do układu rur	80
Rys. 81.	Poprawka temperaturowa ε dla wymiennika U-rurowego z przegrodami ...	81
Rys. 82.	Poprawka temperaturowa ε dla dwusekcyjnego wymiennika U-rurowego z przegrodami.....	81
Rys. 83.	Zależność średniego współczynnika wnikania ciepła od kąta natarcia przy opływie pęczków rur	82
Rys. 84.	Wykres pomocniczy do obliczania przeciętnej prędkości masowej $g_{\max}$ w przestrzeni międzyrurowej	82
Rys. 85.	Układy przegród	83
Rys. 86.	Przegrody poprzeczne	84
Rys. 87.	Wykres funkcji pozwalającej wyznaczyć odstępy między przegrodami	84
Rys. 88.	Przykłady ożebrowania powierzchni	85
Rys. 89.	Kompensator pierścieniowy	86
Rys. 90.	Kompensatory tarczowy i soczewkowy	86
Rys. 91.	Wymienniki ciepła typu „rura w rurze”	87
Rys. 92.	Wielosekcyjny U-rurowy wymiennik ciepła typu „rura w rurze”	87
Rys. 93.	Konfiguracja wymienników ciepła typu „rura w rurze”	88
Rys. 94.	Rozwiązania techniczne wymienników ciepła typu „rura w rurze” (Filtration and Transfer Ltd.)	89
Rys. 95.	Rozwiązania techniczne wymienników ciepła typu „rura w rurze” (Brown Fintube, Inc.)	90
Rys. 96.	Płytowe wymienniki ciepła produkcji Zakładów Urządzeń Przemysłowych w Nysie (licencja System ReHeat Ultra Flex)	91
Rys. 97.	Konfiguracja wymiany ciepła w bioreaktorach	92
Rys. 98.	Różne sposoby ogrzewania (chłodzenia) cieczy w mieszalniku	93
Rys. 99.	Schemat skrobakowego wymiennika ciepła typu Votator	93
Rys. 100.	Wyznaczanie ekonomicznej grubości izolacji cieplnej	94

Rys. 101.	Uogólniona metoda projektowania wymiennika ciepła	95
Rys. 102.	Wyznaczanie całkowitej powierzchni wymiennika ciepła	96
3.	TABELE NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANYCH RÓWNAŃ I WARTOŚCI W PROJEKTOWANIU WYMIENNIKÓW CIEPŁA	97
Tablica 1.	Wartości współczynników przenikania ciepła w wymiennikach	98
Tablica 2.	Wartości funkcji ϕ Schacka dla przepływu burzliwego gazów prostopadle do rurek	99
Tablica 3.	Wartości współczynników wnikania ciepła w wymiennikach	99
Tablica 4.	Zależności bezwymiarowe dla wnikania ciepła w przepływie wymuszonym w rurze	100
Tablica 5.	Zależności bezwymiarowe dla wnikania ciepła przy poprzecznym opływie rur	101
Tablica 6.	Zależności bezwymiarowe dla wnikania ciepła przy przepływie burzliwym, równoległym do pęku rur	102
Tablica 7.	Zestawienie współczynników najważniejszych równań opisujących wnikanie ciepła w konwekcyjnych filmach cieczy.....	103
Tablica 8.	Konwekcja swobodna – wartości stałej równania	108
Tablica 9.	Kondensacja filmowa – wartości stałej równania	109
Tablica 10.	Straty ciepła płaskich powierzchni izolowanych q [W/m^2]	110
4.	SKRÓCONY TOK OBLICZEŃ PROJEKTOWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA	111
ANEKS A.	WYBRANE ELEMENTY KONSTRUKCYJNE WYMIENNIKÓW CIEPŁA	121
Tablica A1.	Króćce ze stali węglowej do pokrycia wykładziną chemoodporną .(0,25, 0,6, 1 i 1,6 MPa).na podstawie BN-75/2211-34.....	122
Tablica A2.	Króćce ze stali węglowej z kołnierzami przyspawanymi okrągłymi płaskimi ($P = 0,25$ i $0,6$ MPa) na podstawie normy BN-75/2211-32	124
Tablica A3.	Króćce ze stali węglowej z kołnierzami przyspawanymi okrągłymi płaskimi ($P = 0,25$ i $0,6$ MPa) .na podstawie normy BN-75/2211-32....	127
Tablica A4.	Króćce ze stali węglowej z kołnierzami przyspawanymi okrągłymi okrągłymi z szyjką ($P = 2,5$ i 4 MPa) na podstawie normy BN-76/2211-41.....	129
Tablica A5.	Króćce ze stali węglowej z kołnierzami przyspawanymi okrągłymi z szyjką ($P = 1,0$ i $1,6$ MPa) na podstawie normy BN-76/2211-40	131
Tablica A6.	Króćce ze stali węglowej z kołnierzami przyspawanymi okrągłymi z szyjką ($P = 1,0$ i $1,6$ MPa) na podstawie normy BN-76/2211-40	133
Tablica A7.	Dna elipsoidalne stalowe o średnicy zewnętrznej od 33,5 do 508 mm według normy PN-64/M-35411	135
Tablica A8.	Dna o małej wypukłości stalowe tłoczone o średnicach wewnętrznych od 600 do 3200 mm według PN-69/M-35413	136

Tablica A9.	Wykonawcze długości rur	137
Tablica A10.	Rurki do budowy wymienników ciepła	137
Tablica A11.	Zewnętrzne średnice D_z powłok cylindrycznych wykonanych z rur stalowych bez szwu według PN-98/H-74252	137
Tablica A12.	Wewnętrzne średnice D_w powłok cylindrycznych zwijanych z blach według BN-64/2201-05	137
Tablica A13a.	Wymiary łap aparatów pionowych (BN-64/2212-02)	138
Tablica A13b.	Główne wymiary łap aparatów pionowych (BN – 64/2252-01)	140
Tablica A14.	Dobór wielkości łap według BN-22126/02	141
Tablica A15a.	Rozmieszczenie otworów w dnie sitowym	142
Tablica A15b.	Zalecane średnice rur oraz podziałki	142
Rys. A1.	Umocowanie rurek w płycie sitowej przez zalanie cyną	143
Rys. A2.	Przykłady łączenia rurek z płytą sitową	143
Rys. A3.	Łączenie płyty sitowej na stałe z płaszczem	144
Rys. A4.	Sposoby łączenia króćców	144
ANEKS B. WYKAZ NORM POMOCNYCH W PROJEKTOWANIU WYMIENNIKÓW CIEPŁA.....		145
ANEKS C. WŁASNOŚCI FIZYKOCHEMICZNE WYBRANYCH MEDIÓW I CIAŁ STAŁYCH		153
Tablica C1.	Parametry fizyczne wody	154
Tablica C2.	Własności fizyczne pary wodnej na linii nasycenia	155
Tablica C3.	Parametry pary wodnej pod ciśnieniem $P = 1$ bar	156
Tablica C4.	Gęstość cieczy i wodnych roztworów	157
Tablica C5.	Dynamiczny współczynnik lepkości cieczy i wodnych roztworów	159
Tablica C6.	Ciepło właściwe cieczy i wodnych roztworów	161
Tablica C7.	Współczynnik przewodzenia ciepła dla cieczy i wodnych roztworów ..	163
Tablica C8.	Parametry fizyczne suchego powietrza przy ciśnieniu atmosferycznym	166
Tablica C9.	Parametry fizyczne wodoru przy ciśnieniu atmosferycznym	167
Tablica C10.	Parametry fizyczne azotu przy ciśnieniu atmosferycznym	167
Tablica C11.	Parametry fizyczne tlenu przy ciśnieniu atmosferycznym	168
Tablica C12.	Parametry fizyczne helu przy ciśnieniu $P = 1$ atm	168
Tablica C13.	Parametry fizyczne amoniaku przy ciśnieniu atmosferycznym	169
Tablica C14.	Parametry fizyczne dwutlenku węgla przy ciśnieniu $P = 1$ bar	169
Rys. C1.	Współczynnik ściśliwości gazów	170
Tablica C15.	Własności płynów w warunkach krytycznych	171
Tablica C16.	Nomogram lepkości gazów – tabela pomocnicza	173

Rys. C2.	Nomogram lepkości gazów pod ciśnieniem $P = 10^5$ Pa	174
Tablica C17.	Nomogram lepkości cieczy – tabela pomocnicza	175
Rys. C3.	Nomogram lepkości cieczy	178
Tablica C18.	Wartości współczynnika lepkości w stanie krytycznym $\eta_{kr} \cdot 10^7$ [Pa·s] ..	179
Rys. C4.	Lepkość zredukowana jako funkcja zredukowanej temperatury i ciśnienia ..	180
Tablica C19.	Lepkościowa stała Sutherlanda dla gazów.....	181
Tablica C20.	Ciepło właściwe molowe dla wybranych substancji	182
Rys. C5.	Molowe ciepło właściwe jako funkcja parametrów zredukowanych stanu T_r i P_r	185
Rys. C6.	Entalpia jako funkcja zredukowanych parametrów stanu T_r i P_r	186
Tablica C21.	Wartości wykładnika n w zależności współczynnika przewodzenia ciepła dla gazów od temperatury	187
Tablica C22.	Wartości krytyczne współczynnika przewodzenia ciepła	187
Rys. C7.	Zredukowany współczynnik przewodzenia ciepła jako funkcja zredukowanych parametrów stanu	188
Tablica C23.	Podstawowe własności cieplne ciał stałych.....	189
5. LITERATURA		191