

**JERZY M. SAWICKI**

Politechnika Gdańska

**DAVOR MALUS**

Uniwerytet w Zagrzebiu

**PIOTR ZIMA**

Politechnika Gdańska

# Hydraulika

## reaktorów

## recyrkulacyjnych

**Gdańsk 2008**

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Romuald Szymkiewicz*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Janusz T. Cieśliński*

RECENZENCI

*Kazimierz Burzyński*

*Wojciech Dąbrowski*

PROJEKT OKŁADKI

*Katarzyna Olszonowicz*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Wydawnictwa PG można nabywać w Księgarni PG (Gmach Główny, I piętro)  
bądź zamówić pocztą elektroniczną ([ksiegarnia@pg.gda.pl](mailto:ksiegarnia@pg.gda.pl)),  
faksem (058 347 16 18) lub listownie (Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej,  
Księgarnia PG, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk)

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej  
Gdańsk 2008

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978–83–7348–247–0

---

## Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	5
1. POJĘCIE PRZEPIYWU RECYRKULACYJNEGO .....	7
2. SPECYFIKA PROCESU RECYRKULACJI .....	9
2.1. Uwarunkowania techniczne.....	9
2.2. Schematy obliczeniowe .....	11
3. ILOŚCIOWY OPIS FUNKCJONOWANIA REAKTORÓW PRACUJĄCYCH BEZ RECYRKULACJI.....	13
3.1. Uwagi ogólne.....	13
3.2. Kinetyka reakcji i przemian.....	14
3.2.1. Przebieg i szybkość reakcji .....	14
3.2.2. Rząd reakcji .....	17
3.2.3. Wpływ ruchu płynu na przebieg reakcji .....	19
3.3. Dynamika przepływu w reaktorze .....	22
3.3.1. Znaczenie aspektów dynamicznych .....	22
3.3.2. Przypadek ogólny.....	22
3.3.3. Przepływ turbulentny .....	23
3.3.4. Modele uproszczone przestrzennie .....	24
3.3.5. Modele kinematyczne .....	25
3.4. Kryterialne zmienne stanu .....	27
3.5. Metody wymiarowania reaktorów .....	28
3.5.1. Robocza klasyfikacja metod .....	28
3.5.2. Metody wskaźnikowe .....	29
3.5.3. Metody algebraiczne .....	31
3.5.4. Metody różniczkowe.....	33
3.5.5. Metody racjonalne .....	34
3.6. Dynamiczno-funkcjonalna charakterystyka reaktorów przepływowych .....	35
3.6.1. Zewnętrzna krzywa rozkładu czasu zatrzymania masy.....	35
3.6.2. Szczególne przypadki rozkładu stężenia końcowego .....	39
3.6.3. Rozkład stężenia znacznika jako funkcjonalna charakterystyka reaktora.....	40
3.6.4. Ruch znacznika a ciągły przepływ masy.....	42
3.6.5. Znaczenie efektywnej redukcji stężenia w procedurach projektowych .....	45
3.7. Laboratoryjne badanie efektywności reaktora .....	48
3.7.1. Uwagi ogólne.....	48
3.7.2. Pomiar stałej szybkości reakcji .....	48
3.7.3. Technika pomiarów znacznikowych.....	52
3.7.4. Przykłady praktyczne.....	53
3.8. Metody uproszczone.....	57
3.8.1. Uwagi ogólne.....	57
3.8.2. Objętościowy i powierzchniowy czas zatrzymania masy w układzie .....	57
3.8.3. Aproksymacja „trójkątna”.....	59

---

4. REAKTORY ROZDZIELAJĄCE STRUMIENŃ PŁYNU.....	60
4.1. Schemat funkcjonalny reaktora rozdzielającego.....	60
4.2. Uwagi o weryfikacji modeli obliczeniowych .....	61
4.3. Wyznaczenie pola prędkości płynu w reaktorze rozdzielającym.....	63
4.3.1. Dobór modelu .....	63
4.3.2. Formułowanie zagadnienia .....	64
4.3.3. Zasada numerycznego rozwiązywania równań ruchu.....	66
4.4. Obliczenie krzywej stężenia końcowego w reaktorze rozdzielającym .....	69
4.4.1. Wybór modelu .....	69
4.4.2. Formułowanie zagadnienia .....	69
4.4.3. Zasada numerycznego rozwiązywania równania transportu masy znacznika.....	70
4.4.4. Wyniki przykładowych obliczeń stężenia końcowego .....	70
4.5. Empiryczna weryfikacja modelu obliczeniowego .....	73
4.5.1. Zakres i wyniki pomiarów .....	73
4.5.2. Dyskusja wyników .....	73
5. REAKTORY ŁĄCZĄCE STRUMIENIE PŁYNU .....	75
5.1. Schemat funkcjonalny reaktora łączącego.....	75
5.2. Przykładowe badanie reaktora łączącego .....	76
5.2.1. Uwagi ogólne.....	76
5.2.2. Charakterystyka badanego reaktora .....	76
5.2.3. Obliczenie pola prędkości przepływu w reaktorze.....	77
5.2.4. Obliczenie krzywej stężenia końcowego w reaktorze łączącym.....	83
5.2.5. Pomiary końcowego stężenia znacznika w reaktorze łączącym .....	90
5.2.6. Dyskusja rezultatów .....	90
6. UWAGI KOŃCOWE.....	91
Bibliografia .....	92
Streszczenie w języku chorwackim .....	95
Streszczenie w języku angielskim .....	105

---

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

$B$	– szerokość
$c$	– stężenie
$C$	– współczynnik Chezy’ego
$D$	– średnica
$D_M$	– współczynnik dyfuzji molekularnej
$D_T$	– współczynnik dyfuzji turbulentnej
$\mathbf{f}$	– jednostkowa siła masowa
$\mathbf{g}$	– przyspieszenie ziemskie
$h$	– średnia głębokość
$H$	– głębokość
$i_o$	– spadek dna
$k$	– stała szybkości reakcji
$K_{ij}$	– współczynnik dyspersji
$K_L$	– współczynnik dyspersji podłużnej
$K_T$	– współczynnik dyspersji poprzecznej
$L$	– dystans
$L_M$	– skala geometryczna
$L_S$	– obciążenie hydrauliczne reaktora
$m$	– masa
$M$	– intensywność impulsu
$M_C$	– masa znacznika
$n_M$	– współczynnik Manninga
$n_R$	– stopień recyrkulacji
$\mathbf{n}_v$	– wektor kierunku prędkości
$O_Z$	– obwód zwilżony
$p$	– ciśnienie
$Q$	– wydatek płynu
$r$	– stopień redukcji stężenia
$r_{dop}$	– wymagana efektywność reaktora
$r_{ef}$	– całkowita efektywność reaktora
$Re$	– liczba Reynoldsa
$R_H$	– promień hydrauliczny
$s_Z$	– stopień zagęszczenia osadu
$S$	– pole powierzchni
$Sc$	– liczba Schmidta
$t$	– czas
$t_n$	– czas napowietrzania
$t_p$	– czas zatrzymania
$t_{ps}$	– średni czas zatrzymania według modelu tłokowego
$\mathbf{u}$	– wektor prędkości
$u_i$	– składowa wektora prędkości
$v$	– prędkość średnia
$v_{cs}$	– prędkość swobodnego opadania
$V$	– objętość

$x, y, z$	–	współrzędne kartezjańskie
$z_i$	–	stężenie osadu czynnego
$z_{ij}$	–	funkcja źródłowa
$Z_i$	–	wypadkowa funkcja źródłowa
$\delta$	–	funkcja Diraca
$\partial_s$	–	odległość od ścianki
$\mu$	–	dynamiczny współczynnik lepkości
$\nu$	–	kinematyczny współczynnik lepkości
$\rho$	–	gęstość
$\tau_s$	–	naprężenie styczne
$\psi$	–	funkcja prądu

**Indeksy**

$B$	–	dopływ boczny
$i$	–	numer składnika
$j$	–	numer reakcji lub przemiany
$K$	–	stan końcowy
$0$	–	stan początkowy
$p$	–	produkt
$R$	–	recyrkulat
$s$	–	substrat
$S$	–	ścieki surowe
$T$	–	turbulentny