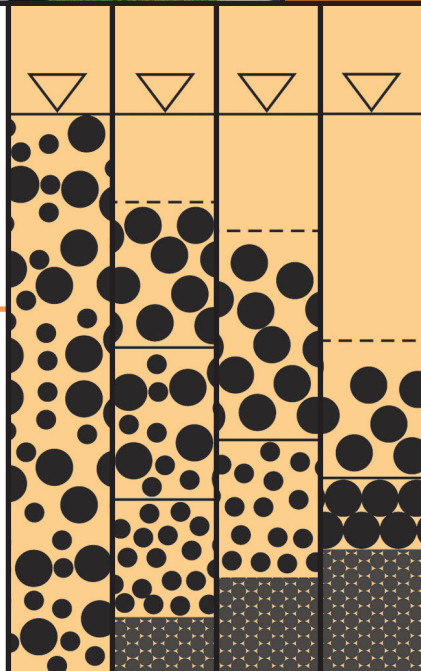
Ryszard Błażejewski

ŚRODOWISKO

# SEDYMENTACJA CZĄSTEK CIAŁA STAŁEGO

## Podstawy teorii z przykładami zastosowań

PWN



Ryszard Błażejewski

# SEDYMENTACJA CZĄSTEK CIAŁA STAŁEGO

## Podstawy teorii z przykładami zastosowań

Ryszard Błażejewski

# SEDYMENTACJA CZĄSTEK CIAŁA STAŁEGO

## Podstawy teorii z przykładami zastosowań

ŚRODOWISKO

PWN

Projekt okładki i stron tytułowych *Joanna Sobieraj*

Ilustracja na okładce *Kekyalyaynen/Shutterstock*

Recenzenci prof. dr hab. inż. Włodzimierz P. Kowalski
dr hab. Piotr Szymczak

Wydawca *Izabela Ewa Mika*

Redaktor prowadzący *Irena Puchalska*

Redaktor *Maria Kasperska*

Produkcja *Mariola Grzywacka*

Łamanie *Ewa Szelatyńska, ScanSystem.pl*

Wydanie publikacji dofinansowane przez Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
*Polska Izba Książki*

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2015

ISBN: 978-83-01-18147-5

Wydanie pierwsze

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
infolinia 801 33 33 88
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
e-mail: pwn@pwn.com.pl, www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp z o. o.

# Spis treści

**Przedmowa** ..... VII
**Ważniejsze oznaczenia** ..... IX

**1. Wstęp** ..... 1

**2. Opadanie pojedynczej cząstki ciała stałego w płynie** ..... 5
2.1. Charakterystyka cząstek stałych ..... 5
2.2. Swobodne opadanie pojedynczej cząstki ..... 7
2.2.1. Opadanie cząstki kulistej ..... 7
2.2.2. Opadanie pojedynczych cząstek niekulistych o regularnych kształtach ..... 23
2.2.3. Opadanie pojedynczych cząstek o nieregularnych kształtach ..... 29
2.3. Opadanie sztywnej kuli w ruchu nieustalonym ..... 30
2.4. Opadanie pojedynczej cząstki w płynie ograniczonym ścianami ..... 32
2.4.1. Kula w cylindrze ..... 32
2.4.2. Walec w cylindrze ..... 38
2.4.3. Kula między równoległymi płytami ..... 39
2.5. Sedymentacja w polu sił odśrodkowych ..... 42

**3. Swobodne opadanie kilku cząstek** ..... 45
3.1. Wprowadzenie ..... 45
3.2. Opadanie dwóch cząstek kulistych ..... 45
3.3. Opadanie trzech cząstek kulistych ..... 52
3.4. Opadanie aglomeratów cząstek ..... 54
3.4.1. Charakterystyka aglomeratów ..... 54
3.4.2. Właściwości sedymentacyjne pojedynczych aglomeratów ..... 60

**4. Rodzaje zawiesin i ich właściwości** ..... 69
4.1. Definicja i rodzaje zawiesin ..... 69
4.2. Właściwości zawiesin ..... 70
4.2.1. Udziały faz w zawiesinie ..... 70
4.2.2. Gęstość zawiesiny ..... 72
4.2.3. Lepkość zawiesin ..... 73
4.3. Rodzaje sedymentacji zawiesin ..... 85

**5. Opadanie cząstek ziarnistych w zawiesinie** ..... 87

5.1. Sedymentacja zawiesin monodyspersyjnych w nieograniczonej przestrzeni ..... 87
5.1.1. Zawiesiny z przypadkowym rozmieszczeniem cząstek ..... 87
5.1.2. Modele sedymentacji zawiesiny jako regularnego układu kul ..... 98
5.2. Ruch pojedynczych dużych cząstek w zawiesinie ..... 102
5.3. Sedymentacja zawiesin polidyspersyjnych w nieograniczonej przestrzeni ..... 103
5.4. Sedymentacja zawiesiny monodyspersyjnej w naczyniu o pionowych ściankach ..... 104
5.4.1. Sedymentacja okresowa ..... 104
5.4.2. Sedymentacja ciągła ..... 112
5.5. Sedymentacja zawiesin polidyspersyjnych w naczyniu o pionowych ściankach ..... 115
5.6. Model osadnika prostopadłościennego o przepływie poziomym ..... 118
5.7. Sedymentacja zawiesin w nachylonych naczyniach i przewodach ..... 122
5.8. Sedymentacja zawiesin w naczyniu stożkowym ..... 127
5.9. Sedymentacja zawiesiny w polu sił odśrodkowych ..... 129

**6. Opadanie cząstek kłaczkowatych w zawiesinie** ..... 132

6.1. Koagulacja i flokulacja ..... 132
6.2. Opadanie kłaczków w zawiesinie ..... 136
6.3. Jednowymiarowe modele osadników wtórnych o pracy ciągłej ..... 141
6.3.1. Model granicznej gęstości strumienia osadu ..... 141
6.3.2. Modele kinetyczne ..... 144

**Literatura** ..... 150

**Skorowidz** ..... 162

# Przedmowa

Książka jest adresowana do studentów kierunków: inżynieria środowiska oraz inżynieria chemiczna i procesowa, a także do doktorantów i wszystkich zainteresowanych zjawiskiem sedymentacji, czyli opadaniem cząstek ciała stałego w cieczy lub gazie.

Niniejsza praca jest próbą wypełnienia pewnej luki w polskim piśmiennictwie. Moim celem było przedstawienie elementarnej wiedzy na temat zjawiska sedymentacji cząstek ciała stałego w płynach – głównie w cieczach newtonowskich, i pokazanie niektórych istotnych zastosowań omawianych zjawisk fizycznych. Z uwagi na złożoność przepływów z wymianą ciepła z otoczeniem dodatkowo ograniczyłem zakres materiału do przepływów adiabatycznych. Z tego samego powodu książka traktuje głównie o jednowymiarowych przepływach dwufazowych i tylko w niewielkim stopniu odnosi się do zagadnień hydrotransportu zawiesin w rurociągach i teorii hydrocyklonów.

Materiał książki podzieliłem na pięć rozdziałów (nie licząc Wstępu) tak, aby prześledzić zjawiska sedymentacji i podać ich przybliżony opis matematyczny – zaczynając od najprostszych przypadków (ruch pojedynczej cząstki kulistej opadającej bardzo powoli w nieograniczonym płynie), a kończąc na najbardziej skomplikowanych (ruch cząstek ciała stałego o różnych wymiarach i kształtach w gęstych zawiesinach, opadających stosunkowo szybko w naczyniach lub zbiornikach).

Matematyczny opis sedymentacji bywa bardzo skomplikowany i wymaga specjalistycznego przygotowania, dlatego też wykorzystałem stosunkowo skromny aparat matematyczny, dostępny większości studentów studiów matematyczno-fizycznych i technicznych. Mimo względnej prostoty opisu matematycznego nie jest on miejscami łatwy do zrozumienia i wymaga wysiłku, choćby przy rozwiązywaniu przykładowych zadań, których tok obliczeń i wyniki Czytelnik może sprawdzić po próbie rozwiązania własnym sposobem.

Składam podziękowania osobom, które pomogły w przygotowaniu tej monografii: pani mgr Elżbiecie Zeyland za szybkie dostarczanie niezbędnej literatury, panu dr. Klausowi Rickertowi za umożliwienie korzystania ze zbiorów biblioteki Uniwersytetu Leibniza w Hanowerze, panu dr. inż. Janowi Borowskiemu za użyczenie literatury i dyskusje o sedymentacji i innych przepływach dwufazowych, a panu mgr. Grzegorzowi Jaszczakowi za wykonanie części rysunków.

Za umożliwienie kontaktów ze środowiskiem warszawskich fizyków zajmujących się sedymentacją i wnikliwą recenzję dziękuję panu dr. hab. Piotrowi Szymczakowi z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Panu prof. dr. hab. inż. Włodzimierzowi P. Kowalskiemu jestem wdzięczny za ukazanie siły teorii w zastosowaniach praktycznych, a także za życzliwą i konstruktywnie krytyczną recenzję. Dziękuję także pani prof. Marii L. Ekiel-Jeżewskiej za poprawki wniesione do niektórych fragmentów tekstu i zgodę na wykorzystanie dwóch rysunków. Wszelkie uwagi krytyczne i komentarze Czytelników chętnie przyjmę pod adresem rblaz@up.poznan.pl i postaram się na nie odpowiedzieć.

Panie redaktor Izabela Mika i Maria Kasperska pomogły mi skutecznie przezwyciężyć trudności formalne i edytorskie, a dofinansowanie druku okazało się możliwe dzięki pomocy finansowej Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, za co uprzejmie dziękuję.

Mojej Żonie, Sadżide, dziękuję za wszechstronne wsparcie, a szczególnie za wiarę oraz podtrzymywanie we mnie wiary w możliwość ukończenia tej książki.

Przeźmierowo-Poznań, styczeń 2015 r. Ryszard Błażejewski