

1544224

О.М. СОКОВНИН
Н.В. ЗАГОСКИНА
С.Н. ЗАГОСКИН

Гидродинамика
движения частиц,
капель и пузырей
в неньютоновских
жидкостях



О.М. СОКОВНИН
Н.В. ЗАГОСКИНА
С.Н. ЗАГОСКИН

Гидродинамика движения частиц, капель и пузырей в неньютоновских жидкостях

НОВОСИБИРСК
«НАУКА»
2019

УДК 532(135+5.011+582.7)::544.773.2/4

ББК 22.253.3:35.111

С 59



*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 19-11-00013, не подлежит продаже*

Соковнин О.М. Гидродинамика движения частиц, капель и пузырей в неньютоновских жидкостях / О.М. Соковнин, Н.В. Загоскина, С.Н. Загоскин. — Новосибирск: Наука, 2019. — 216 с.

ISBN 978-5-02-038801-7.

В монографии на основе анализа классических и оригинальных работ сделана попытка представить текущее состояние исследований в области гидродинамики движения частиц, капель и пузырей в неньютоновских жидкостях. Проанализированы математические модели реологически стационарных и нестационарных (вязкоупругих) неньютоновских жидкостей и даны примеры использования этих моделей. Рассмотрены теоретические основы определения реологических характеристик неньютоновских жидкостей и систематизированы сведения о современных приборах и методах экспериментального исследования их реологии. Показано развитие основных идей и подходов, используемых при аналитических, численных и экспериментальных исследованиях движения частиц, капель и пузырей в неньютоновских жидкостях. Выявлены общие тенденции и имеющиеся противоречия в исследованиях, сформулированы возможные пути их разрешения.

Для научных работников, инженеров и аспирантов, специализирующихся в гидромеханике дисперсных систем, реологии неньютоновских жидкостей.

Табл. 10. Ил. 70. Библиогр.: 305 назв.

Sokovnin O.M. Hydrodynamics of motion of particles, drops and bubbles in non-Newtonian fluids / O.M. Sokovnin, N.V. Zagoskina, S.N. Zagoskin. — Novosibirsk: Nauka, 2019. — 216 p.

In the monograph, based on the analysis of both classical and original papers published recently, an attempt to present the current state of research in the field of hydrodynamics of particles, drops and bubbles motion in non-Newtonian fluids is made. The mathematical models of rheologically stationary and non-stationary, (viscoelastic) non-Newtonian fluids are analyzed and examples of using these models are given.

The theoretical foundations for determining the rheological properties of non-Newtonian fluids are considered. The information about modern instruments and methods of experimental study of the rheological properties of non-Newtonian fluids is systematized.

The development of the main ideas and approaches used in the study of particles, drops and bubbles motion in non-Newtonian fluids is shown. General tendencies and existing contradictions in research are shown and possible ways of their solution are formulated.

This monograph is designed for researchers, engineers and fellows dedicated in hydromechanics of dispersed systems, rheology of non-Newtonian fluids.

Табл. 10. Ил. 70. Ref. 305.

ISBN 978-5-02-038801-7

© О.М. Соковнин, Н.В. Загоскина, С.Н. Загоскин, 2019

© Редакционно-издательское оформление. Новосибирский филиал ФГУП «Издательство «Наука», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	6
Глава 1	
РЕОЛОГИЯ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ	10
1.1. Общие требования и подходы к реологическим моделям не- ньютоновских жидкостей	11
1.2. Модели реологически стационарных жидкостей	13
1.2.1. Чисто вязкие жидкости	13
Модель Оствальда — де Вилия	15
Модель Эллиса	16
Модель Сиско	20
Модель Рейнера — Филиппова	21
Модель Кросса	22
Модели Эйринга	23
Модель Карро	26
1.2.2. Вязкопластические жидкости	28
Модель Шведова — Бингама	28
Модель Гершеля — Балкли	30
Модель Кэссона	32
Модели Шульмана	33
1.2.3. Полиномиальная аппроксимация	34
1.3. Модели реологически нестационарных жидкостей	36
1.3.1. Дифференциальные реологические модели	38
Конвекционные модели Максвелла	38
Модели Олдройда	40
Модель Колемана — Нолла	42
Модель Ривлина — Эриксона	43
Модель Гиезекуса	46
Модель Джонсона — Сегальмана	48
Модель Фан-Тьен — Таннера	50
1.3.2. Интегральные реологические модели	53
Модель Грина — Ривлина	54
Модель Кея — Бернштейна — Керсли — Запаса (К — ВКЗ)	55
Модель Ривлина — Сойерса	56
Модель Вагнера	57

Модель Папанастасиу – Скривена – Макоско (PSM)	58
Модель Дои – Эдвардса (DE)	58
Модель Мида – Ларсона – Дои (MLD)	60
1.3.3. Тиксотропия и реопексия в реологически нестационарных жидкостях	62
Библиографический список	66
Глава 2	
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ СРЕД	76
2.1. Определение характеристик реологически стационарных жидкостей	76
2.1.1. Капиллярная вискозиметрия	76
2.1.2. Ротационная вискозиметрия	80
2.2. Определение характеристик реологически нестационарных жидкостей	84
2.2.1. Режимы работы ротационных реометров	84
2.2.2. Теоретические основы определения характеристик вязкоупругих жидкостей	87
2.2.3. Измерение характеристик вязкоупругих жидкостей	95
Связь релаксационных и осцилляционных характеристик	97
Измерение тиксотропных и реопексных свойств	104
Измерение нормальных напряжений	110
2.3. Основные типы и характеристики реометров	115
2.3.1. Ротационные реометры	116
2.3.2. Оптическая реометрия	117
2.3.3. Акустические реометры	120
Библиографический список	122
Глава 3	
ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ, КАПЕЛЬ И ПУЗЫРЕЙ В НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ	127
3.1. Аналитические решения	127
3.1.1. Движение одиночных частиц	129
3.1.2. Групповое движение частиц	144
3.2. Численные решения	152
3.2.1. Моделирование движения одиночных частиц	153
3.2.2. Моделирование группового движения частиц	170
3.3. Экспериментальные исследования	177
3.3.1. Исследования скачка скорости пузырей в неньютоновской жидкости	177
3.3.2. Движение частиц в неньютоновской жидкости	185
Библиографический список	201
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	207

CONTENTS

SUBSTANTIVE NOTATION	3
INTRODUCTION	6
Chapter 1	
RHEOLOGY OF NON-NEWTONIAN FLUIDS	10
1.1. Requirements and approaches to rheological models of non-Newtonian fluids	11
1.2. Models of rheologically stationary fluids	13
1.2.1. Purely viscous fluids	13
The Ostwald – de Waele model	15
The Ellis model	16
The Sisko model	20
The Reiner – Philippoff model	21
The Cross model	22
Eyring models	23
The Carreau model	26
1.2.2. Viscoplastic fluids	28
The Schvedoff – Bingham model	28
The Hershel – Bulkley model	30
The Casson model	32
Schulman models	33
1.2.3. Polynomial approximation	34
1.3. Models of rheologically non-stationary fluids	36
1.3.1. Differential rheological models	38
Convected Maxwell models	38
Oldroyd models	40
The Coleman – Noll model	42
The Rivlin – Ericksen model	43
The Giesekus model	46
The Johnson – Segalman model	48
The Phan-Thien – Tanner model	50
1.3.2. Integral rheological models	53
The Green – Rivlin model	54

The Kaye – Bernstein – Kearsley – Zapas model (K – BKZ)	55
The Rivlin – Sawyers model	56
The Wagner model	57
The Papanastasiou – Scriven – Macosko model (PSM)	58
The Doi – Edwards model (DE)	58
The Mead – Larson – Doi model (MLD)	60
1.3.3. Thixotropy and rheopexy in rheologically non-stationary fluids	62
References	66
Chapter 2	
METHODS FOR INVESTIGATING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FLUIDS	76
2.1. Determination of the characteristics of rheologically stationary fluids	76
2.1.1. Capillary viscometry	76
2.1.2. Rotational viscometry	80
2.2. Determination of the characteristics of rheologically non-stationary fluids	84
2.2.1. Operating modes of rotational rheometers	84
2.2.2. Theoretical foundations for determining the characteristics of viscoelastic fluids	87
2.2.3. Measurement of the characteristics of viscoelastic fluids	95
Relation between relaxation and oscillatory characteristics	97
Measurement of thixotropic and rheopexy properties . .	104
Measurement of normal stresses	110
2.3. The main types and characteristics of rheometers	115
2.3.1. Rotational rheometers	116
2.3.2. Optical rheometry	117
2.3.3. Acoustic rheometers	120
References	122
Chapter 3	
MOTION OF PARTICLES, DROPS AND BUBBLES IN NON-NEWTONIAN FLUIDS	127
3.1. Analytical solutions	127
3.1.1. The motion of single particles	129
3.1.2. The motion of swarm particles	144
3.2. Numerical solutions	152
3.2.1. Modeling the motion of single particles	153
3.2.2. Modeling the motion of swarm particles	170
3.3. Experimental researches	177
3.3.1. Researches of a bubble velocity jump in a non-Newtonian fluid	177
3.3.2. Motion of particles in a non-Newtonian fluid	185
References	201
CONCLUSION	207