

**НЕСТАЦИОНАРНЫЙ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС
В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
СРЕДАХ**



НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Под редакцией члена-корреспондента РАН Б. Г. Покусаева

Монография



ЛАНЬ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2023

УДК 602
ББК 30.16я73

Н 56 Нестационарный тепломассоперенос в микроструктурированных средах : монография / Б. Г. Покусаев, А. В. Вязьмин, Д. А. Некрасов [и др.] ; под редакцией Б. Г. Покусаева. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 180 с. : ил. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-507-46023-6

В монографии изложены результаты экспериментальных и численных исследований нестационарных процессов тепломассопереноса в микроструктурированных средах, а также даны методики проведения натуральных экспериментов и компьютерного моделирования таких задач. Дан обзор современного состояния задач тепломассопереноса в микроструктурированных средах и область их применения. Рассмотрены следующие задачи: процессы тепло- и массопереноса в мелкозернистых средах, включая движение потоков «жидкость — газ» и «жидкость — пар» с зарождением паровой фазы в процессе движения жидкости; моделирование и экспериментальное исследование гелей как микроструктурированных сред, влияние составов смесевых гелей на их массопроводные свойства, а также показана связь между оптическими свойствами гелевых материалов и их диффузионными свойствами.

Представляет интерес для аспирантов, преподавателей, научных сотрудников и специалистов в области биотехнологии, а также обучающихся по специальностям химико-технологической и биотехнологической направленностей.

УДК 602
ББК 30.16я73

Рецензенты:

М. Г. ЛАГУТКИН — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры процессов и аппаратов химических технологий им. Н. И. Гельперина МИРЭА — Российского технологического университета;
В. Ю. МИТЯКОВ — доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Обложка
П. И. ПОЛЯКОВА

© Издательство «Лань», 2023
© Коллектив авторов, 2023
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Гидродинамика и массоперенос многофазных потоков в зернистом слое.....	5
1.1. Зернистые среды.....	5
1.2. Двухфазные потоки в зернистых средах.....	6
1.2.1. Движение газовых снарядов в вертикальных и наклонных трубках.....	6
1.2.2. Оборудование для экспериментальных исследований.....	7
1.2.3. Времяпролетный метод.....	9
1.2.4. Влияние угла наклона трубки на скорость всплытия.....	9
1.2.5. Безразмерные критерии.....	11
1.2.6. Движение газовых снарядов с учетом процесса массообмена.....	13
1.3. Численное моделирование.....	13
1.3.1. Метод сглаженных частиц.....	13
1.3.2. Описание численной модели.....	14
1.3.3. Учет взаимодействия с твердой фазой.....	17
1.3.4. Расчетная область трубки.....	17
1.3.5. Результаты моделирования.....	18
1.3.6. Моделирование процесса массообмена.....	21
1.4. Анализ результатов.....	25
Глава 2. Тепло-массоперенос в зернистых средах.....	28
2.1. Описание задачи.....	28
2.2. Экспериментальное исследование.....	28
2.3. Описание модели критического истечения.....	29
2.4. Сопоставление с экспериментом и аналитическими расчетами.....	32
2.4.1. Сопоставление с экспериментальными данными.....	32
2.4.2. Сопоставление с аналитическими расчетами.....	34
2.5. Распределение паровой фазы в рабочем участке.....	38
2.6. Исследование тепло-массопереноса в микроячейке.....	41
2.7. Анализ результатов.....	44
Глава 3. Исследование конвективных течений в неподвижном пристенном зернистом слое.....	45
3.1. Экспериментальный метод исследования конвекции.....	45
3.1.1. Оптический измерительный комплекс.....	45
3.1.2. Экспериментальный рабочий участок.....	47
3.1.3. Градиентный датчик теплового потока.....	48
3.1.4. Методика измерения полей температур.....	50
3.2. Конвекция в объеме жидкости без частиц.....	52
3.3. Конвекция в жидкости со сферическими частицами.....	56
3.4. Измерение полей температур в засыпке зернистого слоя.....	60
3.5. Микроконвективные течения в неподвижном пристенном зернистом слое.....	66

3.5.1. Физическая постановка задачи	66
3.5.2. Конвективные течения в пристенном зернистом слое жидкости с цилиндрическими частицами	68
3.5.3. Влияние недогрева жидкости на возникновение микроконвекции	76
3.5.4. Влияние материала частиц на образование паровой фазы	78
3.5.5. Измерение тепловых потоков в процессе нестационарного прогрева пристенного зернистого слоя жидкости	79
3.6. Математическое моделирование свободной конвекции	82
3.6.1. Физическое моделирование нестационарного теплообмена в ячейке пристенного зернистого слоя	82
3.6.2. Математическая постановка задачи	84
3.6.3. Методика численного решения задачи	86
3.6.4. Анализ влияния теплофизических свойств зернистого слоя на теплообмен в пристенной области	88
3.6.5. Результаты моделирования свободной конвекции в ячейке пристенного зернистого слоя жидкости	89
Глава 4. Новые математические методы теории тепло- и массопереноса в структурированных средах	97
4.1. Теоретические методы тепло- и массопереноса	97
4.1.1. Общая характеристика теоретических методов	97
4.1.2. Методы обобщенного разделения переменных для решения нелинейных уравнений тепло- и массопереноса	100
4.1.3. Точные решения нелинейных уравнений тепло- и массопереноса для неоднородных и анизотропных сред	102
4.2. Примеры использования методов обобщенного и функционального разделения переменных для решения нелинейных уравнений тепло- и массопереноса	108
4.2.1. Реакционно-диффузионные уравнения и подходы к их решению	108
4.2.2. Стационарный тепло- и массоперенос в неоднородных анизотропных средах с произвольной кинетической функцией химической реакции	111
4.2.3. Нестационарный массоперенос с модельной кинетикой функцией химической реакции	115
4.2.4. Нестационарный одномерный массоперенос в произвольно неоднородной среде с химической реакцией общего вида	118
4.2.5. Модельная задача о тепловом взрыве в неоднородных средах ...	120
4.2.6. О точных решениях систем уравнений тепло- и массопереноса	123
4.3. Нестационарный тепло- и массоперенос при наличии релаксационных явлений	127
4.3.1. Нестационарные задачи тепло- и массопереноса, учитывающие конечность скорости распространения возмущений	127

4.3.2. Модели теплопроводности и диффузии с конечным временем релаксации	129
4.3.3. Точные решения дифференциально-разностных уравнений теплопроводности	132
4.3.4. Некоторые начально-краевые задачи для дифференциально-разностных уравнений теплопроводности.....	134
4.3.5. Решение трехмерных задач для дифференциально-разностного уравнения теплопроводности	138
4.3.6. Нелинейные дифференциально-разностные уравнения теплопроводности и диффузии	141
Глава 5. Тепломассоперенос в мягкой материи	144
5.1. Нестационарные процессы массопереноса в смесевых гелях	144
5.1.1. Актуальность проблемы	144
5.2. Экспериментальные исследования	146
5.2.1. Материалы, методы, подходы.....	146
5.3. Анализ экспериментальных результатов	151
5.3.1. Оптические свойства смесевых гелей.....	151
5.3.2. Фазовые переходы в смесевых гелях на основе агарозы и желатина	152
5.3.3. Диффузионный перенос в смесевых гелях.....	153
5.3.3.1. Сравнение распространения фронта фуксина и питательной среды в гидрогеле.....	153
5.3.4. Анализ жизнеспособности клеток в гидрогелях различных составов и условиях.....	158
Список использованной литературы.....	165