

УДК 66.015.23:[66.047+66.061+66.071.6]  
ББК 35.113  
Р83

*Рецензенты:*

**Федосов С. В.** — академик РААСН, доктор технических наук, профессор;  
**Липин А. Г.** — заведующий кафедрой «Процессы и аппараты химической технологии» Ивановского государственного химико-технологического университета, доктор технических наук, профессор

### **Рудобашта С. П.**

Р83

Массообмен в процессах сушки, адсорбции, экстрагирования, диффузионной паропроницаемости: монография / С. П. Рудобашта. — М.: «Колос-с», 2024. — 573 с.

ISBN 978-5-00129-408-5

В книге рассмотрены теоретические основы процессов переноса вещества в процессах сушки, адсорбции, экстрагирования, диффузионной паропроницаемости. Дан анализ закономерностей транспорта вещества в фазах, приведены решения основных задач нестационарной массопроводности (диффузии) и методы определения кинетических коэффициентов, данные по фазовому концентрационному равновесию, по массопроводности (диффузии) распределяемого вещества в твердой фазе, по продольному перемещиванию фаз, изложены аналитические методы расчета кинетики процессов с примерами расчетов различных типов аппаратов, рассмотрены работы, содержащие результаты исследований по диффузии и математическому описанию процесса сушки, представленные на крупнейших зарубежных международных конференциях и симпозиумах по сушке XXI-го века (IDS, Eurodrying, NDC, NBDC и др.).

Книга рассчитана на научных работников и инженеров, работающих в области химической, пищевой, строительной, текстильной, легкой, целлюлозно-бумажной промышленности, агропромышленного комплекса, и может быть использована также аспирантами, магистрантами и студентами соответствующих направлений и профилей.

УДК 66.015.23:[66.047+66.061+66.071.6]

ББК 35.113

ISBN 978-5-00129-408-5

© Рудобашта С. П., 2023

© ООО «Издательско-книготорговый центр «Колос-с», 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Условные обозначения .....	9
<b>ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ .....</b>	<b>15</b>
1.1. Структура материалов твердой фазы.....	15
1.2. Классификации материалов твердой фазы .....	24
1.3. Фазовое концентрационное равновесие .....	29
1.4. Основные механизмы внутреннего массопереноса.....	41
1.5. Экспериментальная проверка уравнения массопроводности .....	61
1.6. Аномальная диффузия .....	73
<b>ГЛАВА 2. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА ВО ВНЕШНЕЙ ФАЗЕ.....</b>	<b>89</b>
2.1. Механизмы переноса вещества во внешней фазе .....	89
2.2. Диффузионный пограничный слой и уравнение массоотдачи .....	96
2.3. Критериальные уравнения массоотдачи .....	99
2.4. Критериальные уравнения теплоотдачи, используемые для расчета кинетики сушки в первом периоде .....	114
<b>ГЛАВА 3. МАССОПЕРЕДАЧА .....</b>	<b>119</b>
3.1. Дифференциальные уравнения массо-и теплопроводности ....	119
3.2. Краевые условия задач нестационарной массопроводности ....	124
3.3. Дифференциальные уравнения диффузии при адсорбции и экстрагировании.....	126
3.4. Уравнения рабочих линий и материального баланса типовых схем массопередчи.....	129
3.5. Уравнение массопередачи.....	138
3.6. Стационарная массопередача .....	140
3.7. Линейная задача нестационарной массопроводности при постоянной концентрации распределяемого вещества во внешней среде.....	145
3.8. Регулярный режим нестационарной массопроводности .....	151
3.9. Линейная задача нестационарной массопроводности при переменной концентрации распределяемого вещества во внешней среде.....	153

3.10. Численные решения нелинейных задачи теплопроводности	156
3.11. Зональный метод расчета кинетики теплопередачи .....	160
3.12. Влияние неизотермичности процесса на теплопередачу .....	171
<b>ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ .....</b>	<b>194</b>
4.1. Определение коэффициента теплопроводности .....	194
4.2. Определение относительного коэффициента термодиффузии .....	215
4.3. Определение коэффициентов теплоотдачи .....	218
<b>ГЛАВА 5. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ, АДсорбции, экстрагирования .....</b>	<b>224</b>
5.1. Теплопроводность при сушке .....	224
5.2. Теплопроводность при адсорбции .....	276
5.3. Теплопроводность при экстрагировании .....	289
<b>ГЛАВА 6. КИНЕТИКА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМАХ С ТВЕРДОЙ ФАЗОЙ .....</b>	<b>293</b>
6.1. Общий анализ методов кинетического расчета теплообменных аппаратов для систем с твердой фазой .....	293
6.2. Расчет кинетики процесса при изотермической и квазиизотермической теплопередаче .....	296
6.3. Продольное перемешивание фаз в непрерывно действующем аппарате .....	301
6.4. Учет влияния продольного перемешивания фаз на кинетику теплопередачи .....	311
6.5. Расчет паропроницаемости .....	314
<b>ГЛАВА 7. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ И КИНЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СУШИЛОК .....</b>	<b>318</b>
7.1. Анализ методов кинетического расчета процессов конвективной сушки .....	318
7.2. Использование гидродинамических моделей структур потоков взаимодействующих фаз при описании кинетики сушки .....	330
7.3. Расчет кинетики конвективной сушки на основе дифференциальных уравнений тепло- и теплопроводности А. В. Лыкова .....	333
7.4. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов математическим методом при перекрестном токе фаз .....	339
7.5. Глубокая конвективная сушка гранулированных полимеров .....	345
7.6. Расчет кинетики сушки материала математическим аналитическим методом на основе только уравнения теплопроводности (без привлечения уравнения теплопроводности) .....	351
7.7. Математическая модель кинетики конвективной сушки на основе теории углубления поверхности испарения .....	365

7.8. Численные математические методы расчета кинетики сушки и определение коэффициента диффузии влаги в зарубежных работах.....	374
<b>ГЛАВА 8. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СУШКЕ.....</b>	<b>401</b>
8.1. Введение.....	401
8.2. Осциллирующая электромагнитная сушка пластины (плоского слоя дисперсного материала) .....	403
8.3. Осциллирующая электромагнитная сушка цилиндрического тела .....	420
8.4. Осциллирующая электромагнитная сушка сферического тела .....	430
8.5. Тепломассоперенос при сушке пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты .....	445
<b>ГЛАВА 9. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДсорбЦИИ.....</b>	<b>459</b>
9.1. Общая характеристика математических моделей, используемых при описании кинетики и динамики адсорбции.....	459
9.2. Изотермическая модель адсорбции в неподвижном слое.....	463
9.3. Адиабатическая модель адсорбции в неподвижном слое .....	466
9.4. Короткоцикловая безнагревная адсорбция в неподвижном слое .....	469
<b>ГЛАВА 10. ПРИМЕРЫ КИНЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ.....</b>	<b>474</b>
10.1. Экстрактор непрерывного действия для извлечения низкомолекулярных соединений из гранул поликапроамида.....	474
10.2. Непрерывно действующая сушилка с псевдоожиженным слоем лоткового типа для гранул полиэтилентерефталата.....	477
10.3. Непрерывно действующая шахтная сушилка для гранулированного поликарбоната .....	486
10.4. Периодически действующая фермерская сушилка с псевдоожиженным слоем для зерна кукурузы .....	499
10.5. Расчет кинетики десорбции воды из неподвижного слоя силикагеля.....	511
Литература.....	518