



**М. Я. Кордон  
Н. Н. Вершинин  
Е. О. Гравшенкова**

# **ТЕПЛОФИЗИКА**

**Учебное пособие**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пензенский государственный университет» (ПГУ)

М. Я. Кордон, Н. Н. Вершинин,  
Е. О. Гравшенкова

# Теплофизика

Учебное пособие

Под общей редакцией  
доктора технических наук, профессора  
Н. Н. Вершинина

Пенза  
Издательство ПГУ  
2017

УДК 532.5 (075.8)  
К66

Рецензенты:

кандидат технических наук,  
профессор кафедры «Прикладная информатика»  
Пензенского государственного технологического университета  
*В. В. Бурлов;*

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Инженерная экология»  
Пензенского государственного университета  
архитектуры и строительства  
*Э. А. Овчаренков*

**Кордон, М. Я.**

К66 Теплофизика : учеб. пособие / М. Я. Кордон, Н. Н. Вершинин, Е. О. Гравшенкова ; под общ. ред. д.т.н, проф. Н. Н. Вершинина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – 200 с.

ISBN 978-5-906975-08-9

Изложены основы теплофизики, включающие термодинамические вопросы теплофизики; теплообмен и массообмен. Рассмотрены основные законы, уравнения и расчетные зависимости стационарной и нестационарной теплопроводности, конвективного теплообмена и теплообмена излучением; основы теории массообмена; массообменные процессы с подвижной и неподвижной поверхностью контакта фаз – абсорбционные и адсорбционные процессы. Приведены основные законы и расчетные зависимости массообменных процессов для двухкомпонентных и многокомпонентных систем; мембранные процессы разделения жидкости и газа, применяемые при решении проблем защиты окружающей среды от загрязнений.

Издание подготовлено на кафедре «Техносферная безопасность» ПГУ и предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» (профиль «Инженерная защита окружающей среды»).

УДК 532.5 (075.8)

ISBN 978-5-906975-08-9

© Пензенский государственный университет, 2017

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОФИЗИКИ .....	8
1.1. Основные параметры физического состояния газа .....	8
1.2. Смесь идеальных газов. Закон Дальтона .....	11
1.3. Теплоемкость идеального газа. Уравнение Майера .....	14
1.4. Основные термодинамические процессы. Энтальпия газа. Закон Клайперона. Уравнение Менделеева. Первый закон термодинамики .....	18
2. ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ .....	22
2.1. Виды теплообмена .....	22
2.2. Температурное поле .....	23
2.3. Закон Фурье. Теплопроводность .....	25
2.4. Стационарная теплопроводность .....	27
2.5. Теплопроводность в цилиндрической стенке .....	32
2.6. Нестационарная теплопроводность .....	36
2.6.1. Основные понятия и определения .....	36
2.6.2. Методы решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности .....	41
2.7. Основы конвективного теплообмена .....	47
2.7.1. Основные положения .....	47
2.7.2. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Безразмерные переменные .....	50
2.7.3. Определяющий размер, определяющая температура .....	58
2.7.4. Теплоотдача при течении жидкости (газа) в трубах .....	58
2.7.5. Вязкостный режим .....	60
2.7.6. Вязкостно-гравитационный режим .....	61
2.7.7. Турбулентный режим .....	62
2.7.8. Общий коэффициент теплопередачи .....	63
2.8. Теплообмен излучением .....	65
2.8.1. Основные понятия и определения .....	65
2.8.2. Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой .....	69
2.8.3. Особенности излучения газов и паров. Сложный теплообмен .....	70
2.8.4. Теплообменные аппараты. Классификация теплообменных аппаратов .....	74

3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ МАССООБМЕНА.....	76
3.1. Общие понятия и определения.....	76
3.2. Уравнение массообмена для бинарной смеси.....	78
3.3. Аналогия тепло- и массообмена.....	84
3.3.1. Умеренная интенсивность массообмена.....	84
3.3.2. Высокая интенсивность массообмена.....	87
3.4. Массообменные процессы и аппараты со свободной поверхностью раздела фаз.....	89
3.4.1. Адсорбция газов. Основные положения.....	89
3.4.2. Общий порядок расчета адсорбционной установки.....	93
3.4.3. Использование уравнений скорости массопередачи для насадочных колонн.....	94
3.4.4. Использование материального баланса для расчета движущей силы.....	97
3.4.5. Массопередача между фазами.....	98
3.5. Жидкостная экстракция.....	103
3.5.1. Сущность, основные понятия и определения.....	103
3.5.2. Методы экстракции.....	108
3.6. Процессы перегонки. Дистилляция и ректификация.....	112
3.6.1. Основные понятия и определения.....	112
3.6.2. Простая периодическая дистилляция.....	113
3.6.3. Простая непрерывная дистилляция.....	114
3.6.4. Уравнения рабочих линий ректификационной колонны.....	116
3.6.5. Применение адсорбционных методов для очистки вредных веществ отходящих газов.....	126
3.7. Массообменные процессы с неподвижной поверхностью контакта фаз.....	127
3.7.1. Адсорбция и ионообмен. Статика сорбционных процессов. Природа сорбентов.....	127
3.7.2. Адсорбционный и экстракционный методы разделения.....	130
3.7.3. Межфазовое равновесие.....	131
3.7.4. Безразмерная форма уравнений изотермы адсорбции.....	133
3.7.5. Уравнения ионообмена и фактора разделения.....	135
3.7.6. Ионообмен бинарной смеси.....	138
3.7.7. Равновесие многокомпонентных систем при адсорбции и ионообмене. Расчет изотермы.....	138
3.7.8. Особенности кинетики сорбционных процессов.....	141
3.7.9. Диффузия в твердой фазе сорбента.....	141

3.7.10. Влияние жидкой (газовой) фазы на скорость диффузии.....	143
3.7.11. Определение скорости реакции для процессов ионообмена или обменной адсорбции.....	146
3.7.12. Методы расчета адсорбции.....	148
3.7.13. Применение адсорбции для очистки газов и жидкости.....	152
3.8. Сушка твердых материалов термообработкой.....	155
3.8.1. Общие понятия и определения.....	155
3.8.2. Теоретические основы сушки термообработкой.....	158
3.9. Сушка вымораживанием.....	165
3.9.1. Основные сведения.....	165
3.9.2. Теоретические основы сушки.....	166
3.10. Растворимость газов в воде.....	171
3.11. Кристаллизация.....	173
3.11.1. Равновесные соотношения.....	173
3.11.2. Механизм образования кристаллов в растворах.....	178
3.12. Мембранные процессы разделения жидкости и газа.....	179
3.12.1. Основы переноса в жидкости и газе.....	179
3.12.2. Условия равновесия при разделении газов через перегородку.....	181
3.12.3. Разделение веществ термодиффузией.....	184
3.12.4. Теоретические основы термодиффузии.....	186
3.12.5. Разделение растворенных веществ методом диализа.....	188
3.12.6. Мембранные технологии в решении проблемы охраны природной среды.....	197
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	199