



О. В. Семенович

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности магистратуры
«Ядерные физика и технологии»



Минск
«Адукацыя і выхаванне»
2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА	4
1.1. Основные понятия термомеханики сплошных сред	4
1.2. Законы сохранения массы, импульса, момента импульса и энергии	14
1.2.1. Уравнения сохранения в интегральной форме	14
1.2.2. Теорема переноса	15
1.2.3. Уравнения сохранения в дифференциальной форме	18
1.2.4. Общие уравнения баланса	24
1.3. Необходимые сведения из теории подобия	25
1.3.1. Некоторые понятия и определения	25
1.3.2. Условие применимости модели «сплошной среды». Критериальное число Кнудсена	26
ГЛАВА 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ	27
2.1. Основные термины	27
2.2. Уравнение теплопроводности	29
2.3. Условия однозначности	34
2.4. Критериальные числа, характеризующие процессы теплопроводности	35
2.5. Некоторые важные примеры	36
2.5.1. Пластина без тепловыделения	36
2.5.2. Пластина с постоянным тепловыделением	38
2.5.3. Критический диаметр тепловой изоляции	41
2.5.4. Теплообмен в конструкциях с оребренными поверхностями	43
2.5.5. Нестационарная задача теплопроводности для неограниченной пластины (граничные условия 3-го рода)	49
2.6. Регулярный режим теплообмена	57
2.7. Циклические изменения температуры	64
2.8. Контактный теплообмен	68

ГЛАВА 3. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ	72
3.1. Основные термины	72
3.2. Законы теплового излучения	77
3.2.1. Закон Кирхгофа	77
3.2.2. Закон Стефана — Больцмана	78
3.2.3. Закон Ламберта	79
3.3. Радиационные характеристики реальных тел	79
3.4. Плотность теплового потока, обусловленного излучением	81
3.4.1. Теплообмен излучением в простых системах	81
3.4.2. Угловые коэффициенты	84
3.4.3. Коэффициент теплоотдачи излучением	85
 ГЛАВА 4. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОМАССООБМЕН В ОДНОФАЗНЫХ ПОТОКАХ	 86
4.1. Основные понятия и определения	86
4.2. Реологические уравнения (реологические законы)	95
4.2.1. Идеальная жидкость	96
4.2.2. Ньютоновская жидкость	97
4.3. Пограничный слой: начальные сведения	100
 ГЛАВА 5. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	 105
5.1. Турбулентность: основные понятия	105
5.2. Методы моделирования турбулентности:	
краткая характеристика	114
5.2.1. Метод Рейнольдса	114
5.2.2. Вихреразрешающие методы	122
5.2.3. Перспективы широкого применения в расчетной практике различных методов моделирования турбулентности	135
5.3. Полуэмпирические модели турбулентности	137
5.3.1. Уравнения Рейнольдса для ньютоновской жидкости	137
5.3.2. Этапы развития и классификация полуэмпирических моделей турбулентности	146
5.3.3. Гипотеза Буссинеска	147
5.3.4. Алгебраические модели турбулентности	150
5.3.5. Модели с одним уравнением	155
5.3.6. Модели с двумя уравнениями для кинетической энергии турбулентности k и диссипации ϵ	156

5.3.7. Модели рейнольдсовых напряжений	160
5.3.8. Несовершенство моделей турбулентности, кризис в развитии и перспективы их использования	161
ГЛАВА 6. ДИФфуЗИОННЫЙ МАССООБМЕН	163
ГЛАВА 7. КОНДЕНСАЦИЯ И КИПЕНИЕ	173
7.1. Конденсация	173
7.1.1. Конденсация в объеме	173
7.1.2. Конденсация на поверхности	174
7.2. Кипение	184
7.2.1. Кипение в объеме	184
7.2.2. Кипение на поверхности	185
ГЛАВА 8. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В МНОГОФАЗНОЙ СРЕДЕ	190
8.1. Необходимые определения	191
8.2. Современные методы описания процессов тепломассопереноса в многофазных средах	197
8.3. Модель раздельного течения фаз	197
8.3.1. Уравнения баланса на границе раздела фаз	198
8.3.2. Уравнения баланса на границе раздела фаз для турбулентного потока	209
8.3.3. Уравнения модели раздельного течения фаз	212
ГЛАВА 9. ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ	227
ГЛАВА 10. ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В ТРУБАХ	235
10.1. Течение в круглой трубе. Начальные сведения	235
10.2. Гидравлические сопротивления	239
10.2.1. Сопротивление трения	240
10.2.2. Местные гидравлические сопротивления	250
10.2.3. Сопротивление, обусловленное ускорением потока	254
10.2.4. Нивелирный напор	254
10.3. Структура однофазного турбулентного потока в круглой трубе. Универсальный профиль скорости	254
10.4. Течение двухфазного потока в трубе	265

10.4.1. Режимы течения	266
10.4.2. Методика Мартинелли – Нельсона	269
10.5. Теплообмен при течении в трубах	271
10.5.1. Теплоотдача при течении однофазного теплоносителя ...	271
10.5.2. Теплообмен в трубах при кипении	274
ГЛАВА 11. ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА СТЕРЖНЕВЫХ ТВС	283
11.1. Методы математического моделирования термогидродинамических процессов в стержневых ТВС	284
11.1.1. Методы расчета локальной структуры потока	284
11.1.2. Приближение «пористого тела»	285
11.1.3. Субканальное приближение	285
11.2. Гидравлические сопротивления и коэффициенты теплообмена в пучках цилиндрических стержней	289
11.2.1. Гидравлические сопротивления пучков стержней	290
10.2.2. Коэффициенты теплоотдачи	293
11.3. Теплообмен при повторном заливе	295
Приложение	302
Литература	310