

Министерство образования и науки России
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

В.Г. Дьяконов, О.А. Лоницаков

ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Учебное пособие

Казань 2011

УДК 621.1.016.7(075)

Основы теплопередачи: учеб. пособие/ В.Г. Дьяконов, О.А Лонцаков; М-во образ. и науки РФ, КНИТУ; Казань, 2011. – 232 с. ISBN ; 9: /7/9: : 4/3336/7""

В доступной и краткой форме изложены основы процессов теплопередачи. Приведено математическое описание процесса конвективного теплообмена на основе применения известных физических законов сохранения: энергии, количества движения, массы и граничных условий стенка-жидкость. Запись этой системы дифференциальных уравнений в относительных величинах позволила сформулировать основные положения теории подобия как метода расчета сложных процессов, которые нельзя строго рассчитать аналитическим путем.

Предназначено для студентов всех форм обучения, изучающих дисциплину «Основы теплопередачи».

Подготовлено на кафедре теоретических основ теплотехники КНИТУ.

Ил. 101. Библиогр.: 17 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета.

Рецензенты:

канд. техн. наук, проф. каф. ТОТ КГТУ (КАИ) Ф.Н. Дресвянников
д-р. техн. наук, проф. каф. теплоэнергетики КГАСУ Р.А. Садыков

ISBN 978-5-7882-1114-5 © Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2011 г.

.
А
*Посвящается светлой памяти
Германа Константиновича Дьяконова,
основателя кафедры «Общая теплотехника»
Казанского национального исследовательского
технологического университета*



Герман Константинович Дьяконов

О Г Л А В Л Е Н И Е

Список основных обозначений	7
Предисловие	8
Введение	9
Глава 1. Основные понятия и законы переноса теплоты	11
1.1. Теплопроводность при стационарном режиме	11
1.2. Основной закон теплопроводности. Закон Фурье	12
1.3. Дифференциальное уравнение теплопроводности	14
1.4. Применение дифференциального уравнения теплопроводности для решения практических задач	17
1.4.1. Теплопроводность плоской однослойной стенки при стационарном режиме	17
1.4.2. Теплопроводность плоской многослойной стенки	18
1.4.3. Теплопроводность однослойной цилиндрической стенки	20
1.4.4. Теплопроводность многослойной цилиндрической стенки	23
1.5. Конвективный теплообмен. Теплоотдача	24
1.5.1. Теплопередача. Теплопередача через плоскую стенку. Основное уравнение теплопередачи. Коэффициент теплопередачи	26
1.5.2. Теплопередача через однослойную цилиндрическую стенку	29
1.5.3. Интенсификация процессов теплопередачи	32
1.5.4. Теплопередача через оребренную стенку	34
1.6. Тепловая изоляция	36
1.7. Элементы классификации теплообменных аппаратов	40
1.7.1. Основы расчета теплообменных аппаратов	41
1.7.2. Средний логарифмический температурный напор между теплоносителями в процессе теплопередачи	44
Глава 2. Основные положения теории конвективного переноса теплоты	48
2.1. Конвективный теплообмен	48
2.1.1. Гидродинамический пограничный слой	53
2.1.2. Тепловой пограничный слой	54
2.2. Аналитическое описание процесса конвективного теплообмена	55
2.2.1. Дифференциальное уравнение теплоотдачи	55

2.2.2. Дифференциальное уравнение энергии	56
2.2.3. Дифференциальные уравнения движения	59
2.2.4. Дифференциальное уравнение неразрывности	62
2.2.5. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена для пограничного слоя	65
2.3. Теория подобия	67
2.3.1. Приведение системы дифференциальных уравнений, описывающих подобные процессы для пограничного слоя к безразмерной форме записи (метод масштабных преобразований)	70
2.3.2. Дифференциальное уравнение движения для двух подобных процессов в относительных величинах	75
2.4. Теоремы подобия	75
2.5. Что дает теория подобия для решения задач конвективного теплообмена	79
Глава 3. Теплоотдача в потоках жидкостей и газов	80
3.1. Расчет коэффициентов теплоотдачи при вынужденном движении различных жидкостей в трубах	80
3.2. Расчет коэффициента теплоотдачи при вынужденном ламинарном вязкостно-гравитационном течении	81
3.2.1 Физика протекания процесса теплоотдачи при вынужденном ламинарном движении в вертикальных трубах при совпадении и прямо противоположных направлениях вынужденного и свободного движений	81
3.2.2 Расчет коэффициентов теплоотдачи при вынужденном ламинарном вязкостно-гравитационном течении в горизонтальных трубах при $Re < 2300$	82
3.2.3. Расчет коэффициента теплоотдачи при турбулентном движении различных жидкостей	83
3.3. Особенности процесса теплоотдачи при поперечном омывании одиночных труб и пучков труб. Гидродинамика и теплоотдача при движении жидкости в пучках труб	85
3.4. Теплоотдача при фазовом превращении (конденсации и кипении)	90
3.4.1. Теплоотдача при конденсации пара	90
3.4.2. Пленочная конденсация чистого пара на вертикальной поверхности	91
3.4.3. Теплоотдача при кипении	94
3.4.4. Режимы кипения	97

3.4.5. Количественное описание процесса теплоотдачи при пузырьковом кипении	99
Глава 4. Теплообмен излучением	101
4.1. Перенос теплоты путем теплового излучения	101
4.2. Спектры излучения	101
4.3. Законы теплового излучения	103
4.3.1. Закон Планка	103
4.3.2. Закон смещения Вина	104
4.3.3. Закон Стефана-Больцмана	104
4.4. Расчет теплового излучения между двумя телами	105
4.5. Назначение экранов	106
4.6. Особенности расчета излучения газов	107
4.7. Сложный теплообмен	109
Глава 5. Применение теории подобия применительно к эксперименту. Лабораторный практикум	111
5.1. Теплотехнические измерения	111
5.1.1. Измерения температур	112
5.1.2. Измерение давления	112
5.1.3. Измерение расходов	113
5.1.4. Измерение тепловых потоков	113
Лабораторная работа №1. Исследование теплоотдачи при вынужденном поперечном омывании воздухом нагретой одиночной трубы	114
Лабораторная работа № 2. Исследование теплоотдачи при свободном движении воздуха около нагретой горизонтальной трубы	131
Лабораторная работа № 3. Исследование теплоотдачи при кипении воды в большом объеме при атмосферном давлении	147
Лабораторная работа № 4. Исследование местной теплоотдачи при вынужденном турбулентном движении воздуха в трубе	162
Лабораторная работа № 7. Определение степени черноты металлов	176
Лабораторная работа № 14. Исследование процесса теплопереда- чи в теплообменном аппарате с оребренными стенками труб	192
5.2. Оценка погрешности эксперимента	225
5.2.1. Общие сведения	225
5.2.2. Вычисление погрешности измерения	226
5.2.3. Пример	227
Библиографический список	229

Список основных обозначений

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 C – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
 d – диаметр, м ;
 E – плотность потока излучения, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;
 G – массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$;
 h – удельная энтальпия, $\text{Дж}/\text{кг}$;
 M – масса, кг ;
 k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
 ℓ – длина, м ;
 n – нормаль к поверхности;
 p – давление, Па ;
 q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; удельная теплота, $\text{Дж}/\text{кг}$;
 q_{ℓ} – линейная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 r – скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$;
 R – термическое сопротивление, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; отражательная способность; радиус, м ; индивидуальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
 t – температура, $^{\circ}\text{C}$;
 T – абсолютная температура, К ;
 \bar{T} – средняя температура, К ;
 $\Delta \bar{T}$ – средний температурный напор, К ;
 w – скорость, $\text{м}/\text{с}$;
 x – координата, м ;
 α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
 δ – толщина стенки, м ; толщина пограничного слоя, м ;
 ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;
 λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Индексы и другие сокращения

v – при постоянном объеме;	кр – критический;
p – при постоянном давлении;	гр – граница;
0 – начальные условия;	(') – жидкость в состоянии насы-
p – пар;	щения;
$ж$ – жидкость;	('') – пар в состоянии насыщения