

А.В. ЧИЧИНДАЕВ

ТЕПЛОМАССООБМЕН  
ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА  
В КОМПАКТНЫХ  
ПЛАСТИНЧАТО-РЕБРИСТЫХ  
ТЕПЛООБМЕННИКАХ

НОВОСИБИРСК  
2009

УДК 621.1.016  
Ч-726

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В.И. Терехов*,  
д-р техн. наук, доц. *Ю.В. Дьяченко*

**Чичиндаев А.В.**

Ч-726 Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках : монография / А.В. Чичиндаев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – 298 с. (Серия «Монографии НГТУ»)

ISBN 978-5-7782-1274-9

Рассматриваются вопросы расчета, проектирования и оптимизации компактных теплообменников для современной авиационной, корабельной и автомобильной техники. Дается общее представление об устройстве, принципе действия, особенностях работы пластинчато-ребристых теплообменников. Приводится классификация имеющихся в промышленности оребренных поверхностей и даются представления о расчете, проектировании и оптимизации конструкции наиболее распространенных вариантов компактных теплообменников. В монографии содержатся оригинальные авторские результаты, полученные при выполнении научно-исследовательской работы по заказам авиационных фирм.

Книга предназначена для специалистов в области разработки авиационных и наземных систем кондиционирования воздуха, систем охлаждения двигателей, холодильной техники, она также будет полезна аспирантам, магистрантам и студентам при изучении разделов проектирования современного теплообменного оборудования.

УДК 621.1.016

ISBN 978-5-7782-1274-9

© Чичиндаев А.В., 2009  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2009

Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

---

A.V. CHICHINDAEV

# HEAT-MASS EXCHANGE OF HUMID AIR IN COMPACT PLATE-FIN HEAT EXCHANGERS

NOVOSIBIRSK  
2009

UDC 621.1.016  
C-726

Reviewers:  
Prof. *V.I. Terekhov*, D.Sc. (Eng.),  
Assoc. Prof. *Yu.V. D'yachenko*, D.Sc. (Eng.),

**Chichindaev A.V.**

C-726 Heat-mass exchange of humid air in compact plate-fin heat exchangers : monograph / A.V. Chichindaev. – Novosibirsk : NSTU publisher, 2009. – 298 pp. (the NSTU Monographs series)

ISBN 978-5-7782-1274-9

Design, development and optimization of compact heat exchangers for up-to-date aeronautical, naval and automotive engineering are discussed in the book. General concepts of the structure, principle of operation and peculiarities of functioning of plate-fin heat exchangers are described. A classification of commercially available finned surfaces is given and a general idea of the design, development and optimization of the structure of most common compact heat exchangers is presented. The monograph contains original results obtained by the author when doing research under order of aircraft companies.

The book is intended for specialists in developing aircraft and ground air cooling systems, engine cooling systems and refrigerating machines. It will also be of use for undergraduate, graduate and postgraduate students who study the design and operation of modern heat exchangers.

**UDC 621.1.016**

**ISBN 978-5-7782-1274-9**

© Chichindaev A.V., 2009  
© Novosibirsk State  
Technical University, 2009

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Тепломассообмен влажного воздуха в теплообменных аппаратах имеет чрезвычайно важное значение для авиационных систем кондиционирования воздуха, систем приточной вентиляции при эксплуатации на территориях с низкими температурами, систем кондиционирования помещений в условиях повышенной влажности (бассейнов), систем охлаждения автомобильных двигателей, корабельной техники, компрессоров, тепловых электрических станций и других приложений, где в качестве охлаждающего теплоносителя используется влажный воздух.

Первая работа по компактным пластинчато-ребристым теплообменникам (КПРТ) В.М. Кейса, А.Л. Лондона «Компактные теплообменники» (М.: Энергия, 1967) больше не переиздавалась. В 1978 году опубликован учебник Г.И. Воронина «Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования», в котором имеется краткая информация о компактных теплообменниках. В последующем типы ребрений рассматривались в работах известных специалистов Г.И. Воронина, Г.А. Дрейцера, Е.В. Дубровского, Э.К. Калинина, С.А. Ярхо. Однако эти работы посвящены вопросам повышения эффективности компактных теплообменников исключительно на примере сухого воздуха. В них отсутствуют результаты исследований и рекомендации по учету влияния тепломассообмена влажного воздуха на эффективность работы компактных теплообменников. Еще менее изучена проблема работы теплообменных аппаратов при наличии отрицательных температур в охлаждающем теплоносителе.

В настоящей монографии представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния фазовых превращений влажного воздуха на процесс теплопередачи в компактных пластинча-

то-ребристых теплообменниках, а также описаны методы защиты теплопередающей поверхности от обмерзания и термических напряжений на эксплуатационных режимных параметрах.

В области прикладного исследования проведен комплекс работ, направленный на изучение эксплуатационных особенностей работы и создание методов оптимизации параметров компактных теплообменников, в частности:

- разработаны методы и способы защиты теплообменника-конденсатора от обмерзания теплопередающей поверхности;
- разработаны методы и способы защиты первичного теплообменника от термических напряжений в теплопередающей поверхности;
- исследована интенсификация процессов тепломассообмена в компактном теплообменнике за счет фазовых превращений при воздушно-испарительном охлаждении.

Результаты исследований нашли применение в решении актуальных задач в интересах авиационной промышленности при разработке перспективной техники на таких предприятиях, как «Наука» (г. Москва), ОКБ им. А.Н. Туполева (г. Москва), ОКБ им. Ильюшина (г. Москва), Государственный сибирский НИИ авиации им. С.А. Чаплыгина, НАПО им. В.П. Чкалова (г. Новосибирск). Материалы, положенные в основу монографии, использованы для создания учебных курсов «Теплообменные устройства», «Компьютерное моделирование физических процессов» по специальности 160201 – Системы жизнеобеспечения оборудования летательных аппаратов и написания трех учебников [42, 151, 152], выпущенных в серии «Учебники НГТУ», имеющих гриф УМО Министерства образования и науки Российской Федерации. Поэтому книга может быть полезна для учебного процесса в вузах авиационной направленности, а также для специалистов в области разработки и конструирования авиационных и наземных систем кондиционирования воздуха, систем охлаждения двигателей, холодильной техники, занимающихся проектированием современного теплообменного оборудования.

В монографии представлены оригинальные результаты, полученные при выполнении научно-исследовательской работы по заказам ряда авиационных фирм, а также материалы докторской диссертации. В книге рассмотрены назначение, особенности работы, расчета, проектирования и оптимизации компактных теплообменников для современ-

ной авиационной, корабельной и автомобильной техники. Представленный в монографии материал будет способствовать развитию и внедрению в отечественное производство новых технических решений и технологий, направленных на повышение ресурса и эксплуатационной надежности теплообменного оборудования.

*Первая глава* посвящена обзору современного состояния вопроса по экспериментальному и теоретическому изучению, расчету, проектированию и оптимизации компактных пластинчато-ребристых теплообменников с двухфазными теплоносителями. *Вторая глава* содержит результаты экспериментального исследования теплоотдачи к трехфазному потоку водного аэрозоля в широком диапазоне изменения параметров влажного воздуха и тепловых потоков. В *третьей главе* представлена дифференциальная методика расчета теплопередачи в КПРТ для случая теплообменника-конденсатора, учитывающая процессы тепломассообмена влажного воздуха и явление начального участка в обоих трактах теплообменника. *Четвертая глава* содержит описание методов тепловой защиты теплопередающей поверхности и методики для оценки их эффективности. В *пятой главе* описываются особенности тепломассообменных процессов в теплообменнике-конденсаторе и предложенный эффективный способ защиты теплопередающей поверхности от обмерзания. В *шестой главе* приведены особенности теплонапряженного состояния первичного теплообменника и результаты исследования эффективности предложенных способов защиты теплопередающей поверхности от термических напряжений. В *седьмой главе* рассмотрены результаты исследования эффективности воздушно-испарительного охлаждения на примере воздухо-жидкостного КПРТ.

Автор глубоко признателен профессору Г.А. Дрейцеру за поддержку данной работы и ценные советы, высказанные в 2003 году при разработке учебного пособия для студентов вузов по данной теме. Автор выражает признательность академику РАН Э.П. Волчкову, доктору технических наук В.И. Терехову, заведующему кафедрой технической теплофизики НГТУ доктору технических наук Ю.В. Дьяченко за помощь при постановке задачи, полезные замечания, сделанные при рецензировании рукописи, а также сотрудникам кафедры технической теплофизики и филиала кафедры при Институте теплофизики СО РАН за оказанную помощь при обсуждении и анализе полученных результатов. Автор признателен магистрантам и аспирантам кафедры ТТФ, оказав-

шим помощь в технической работе над материалами книги, в особенности И.В. Фомичевой, Е.В. Шкваркиной.

Материалы книги подготовлены при поддержке ФЦП Министерства образования и науки Российской Федерации по направлению «Фундаментальные исследования в области технических наук» (гранты № Т00-1.2-260 и № Т02-01.2-3663), ФЦП «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки» («Интеграция», проекты № А0050 и № Б0097) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05-08-33588, № 09-08-00321).



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	7
Условные обозначения .....	11
Введение .....	13
Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ, РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПАКТНЫХ ПЛАСТИНЧАТО-РЕБРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ .....	19
1.1. Назначение и устройство теплообменных аппаратов .....	19
1.2. Методы проектирования и оптимизации КПРТ .....	28
1.3. Особенности конструкции, эксплуатации и расчета ребренных поверхностей .....	35
1.4. Классификация ребрений КПРТ по способу турбулизации потока и форме поперечного сечения .....	42
1.5. Тепломассообмен в двухфазных дисперсных потоках .....	53
1.6. Проблема эксплуатационной оптимизации параметров КПРТ .....	63
Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ К ТРЕХФАЗНОМУ ПОТОКУ ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ .....	73
2.1. Описание экспериментальной установки .....	74
2.2. Осредненная теплоотдача к потоку водного аэрозоля .....	81
2.3. Локальная теплоотдача к потоку водного аэрозоля .....	87
Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КОМПАКТНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ .....	99
3.1. Математическая модель процесса теплопередачи в компактном теплообменнике .....	99
3.2. Особенности тепломассообмена в холодном тракте и гидродинамики водного аэрозоля .....	106
3.3. Расчет тепломассообмена в двух- и трехфазных потоках водного аэрозоля .....	116
3.4. Расчет тепломассообмена в пограничном слое .....	121
3.5. Проверка достоверности математической модели .....	127

Глава 4. ЗАЩИТА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОМПАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА .....	139
4.1. Задачи защиты теплопередающей поверхности .....	139
4.2. Оценка технологической эффективности теплообменника ....	145
4.3. Оценка тепловой эффективности теплообменника .....	153
4.4. Оценка эксплуатационной эффективности теплообменника .....	160
Глава 5. ТЕПЛОМАССОБМЕН ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В ТЕПЛООБМЕННИКЕ-КОНДЕНСАТОРЕ И ЗАЩИТА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ОБМЕРЗАНИЯ .....	169
5.1. Конденсация влаги в линиях высокого и низкого давления СКВ .....	169
5.2. Процессы тепломассообмена в теплообменнике-конденсаторе .....	177
5.3. Назначение и особенности теплообменника-конденсатора ....	185
5.4. Теплопередача в теплообменнике-конденсаторе при работе на влажном воздухе .....	189
5.5. Защита теплопередающей поверхности от обмерзания .....	210
Глава 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПЕРВИЧНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ И ЗАЩИТА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ .....	219
6.1. Особенности работы первичного теплообменника .....	219
6.2. Особенности работы конструкционных материалов .....	223
6.3. Тепловая защита первичного теплообменника .....	230
6.4. Исследования эксплуатационной эффективности ПТО .....	236
6.5. Влияние конструкции теплообменника на процесс теплопередачи .....	242
Глава 7. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В КОМПАКТНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ ПРИ ВОЗДУШНО-ИСПАРИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ .....	249
7.1. Особенности воздушно-испарительного теплообменника ....	249
7.2. Конструктивное исполнение ВИТ .....	252
7.3. Особенности конструкции и расчета форсуночных ВИТ .....	258
7.4. Исследование работы воздушно-жидкостного теплообменника .....	264
7.5. Исследование эффективности воздушно-испарительного охлаждения .....	268
Заключение .....	275
Литература .....	278

## CONTENTS

Foreword.....	7
Notation .....	11
Introduction.....	13
Chapter 1. Classification, Design and Optimization of Compact Plate-Fin Heat Exchangers (CPFHE).....	19
1.1. The design and function of heat exchange apparatuses .....	19
1.2. CPFHE design and optimization methods .....	28
1.3. Peculiarities of the design, operation and calculation of finned surfaces.....	35
1.4. A classification of CPFHE finnings based on the flow turbuli- zation method and sectional shape .....	42
1.5. Heat-mass exchange in two-phase dispersed flows .....	53
1.6. Operational optimization of CPFHE parameters .....	63
Chapter 2. Experimental Research on Heat Transfer to a Three-Phase Flow of a Water Aerosol .....	73
2.1. Description of an experimental installation .....	74
2.2. Averaged heat transfer to a water aerosol flow.....	81
2.3. Local heat transfer to a water aerosol flow .....	87
Chapter 3. Simulation of a Heat Transfer Process in a Compact Heat Ex- changer .....	99
3.1. A mathematical model of the heat transfer process in a com- pact heat exchanger .....	99
3.2. Peculiarities of heat-mass exchange in a cold channel and of hydrodynamics of a water aerosol .....	106
3.3. Calculation of heat-mass exchange in two- and three-phase flows of a water aerosol.....	116
3.4. Calculation of heat-mass exchange in a boundary layer .....	121
3.5. Validation of the mathematical model.....	127

Chapter 4. Protection of Heat Transfer Surfaces of a Compact Heat Exchanger.....	139
4.1. Protection of a heat transfer surface.....	139
4.2. Estimation of technological effectiveness of a heat exchanger.....	145
4.3. Estimation of thermal effectiveness of a heat exchanger.....	153
4.4. Estimation of operational effectiveness of a heat exchanger.....	160
Chapter 5. Heat-Mass Exchange of Humid Air in a Heat Exchanger-Condenser and Frosting Protection of Heat Transfer Surfaces.....	169
5.1. Moisture condensation in lines of high and low pressure in systems of air conditioning.....	169
5.2. Heat-mass exchange processes in a heat exchanger-condenser.....	177
5.3. Peculiarities of a heat exchanger-condenser.....	185
5.4. Heat transfer in a heat exchanger-condenser operating in humid air.....	189
5.5. Frosting protection of heat transfer surfaces.....	
Chapter 6. Study of Heat Transfer in a Primary Heat Exchanger and Protection of Heat Transfer Surfaces against Thermal Stresses.....	219
6.1. Peculiarities of primary heat exchanger operation.....	219
6.2. Peculiarities of structural material behavior.....	223
6.3. Thermal protection of a primary heat exchanger.....	230
6.4. Study of operational effectiveness of a primary heat exchanger.....	236
6.5. Influence of a heat exchanger design on the heat transfer process.....	242
Chapter 7. Heat Transfer in A Compact Heat Exchanger with Air-Evaporation Cooling.....	249
7.1. Peculiarities of an air-evaporation heat exchanger (AEHE).....	249
7.2. The AEHE design.....	252
7.3. Design peculiarities of a spray-type AEHE.....	258
7.4. Operation of an air-liquid heat exchanger.....	264
7.5. Study of air-evaporation cooling effectiveness.....	268
Conclusion.....	275
References.....	278