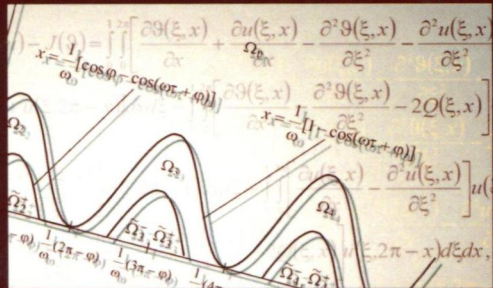


МАГИСТРАТУРА  
И АСПИРАНТУРА

Н. М. Цирельман

# КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС

МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ,  
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ



[www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com)



ЭБС  
ЛАНЬ® ЛАНЬ

Н. М. ЦИРЕЛЬМАН

**КОНВЕКТИВНЫЙ  
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
ИДЕНТИФИКАЦИЯ,  
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ**

*Монография*

Издание второе,  
исправленное и дополненное



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
МОСКВА · КРАСНОДАР  
2018

ББК 31.31я73

Ц 68

**Цирельман Н. М.**

**Ц 68** Конвективный теплоперенос: моделирование, идентификация, интенсификация: Монография. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2018. — 472 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-2978-3**

Рассмотрены методы получения аналитических и приближенных аналитических решений прямых и обратных задач теплопереноса в подвижной среде. Учтены многомерность геометрической области и зависимость теплофизических свойств среды, параметров граничных условий, вектора скорости потока и мощности источников объемного тепловыделения от координат, времени и (или) от потенциалов переноса теплоты и вещества. Эти результаты получены как в рамках математического моделирования, так и при использовании методов обобщенных переменных и анализа размерностей. Разработаны методы и проведена идентификация параметров конвективного теплообмена в целом ряде элементов конструкций технически важных объектов. Исследованы аспекты интенсификации обменных процессов в движущейся среде внесением в нее неоднородностей по давлению.

Монография предназначена для организаций и предприятий, связанных с исследованием процессов теплопереноса, с разработкой теплонагруженной техники и теплоиспользующих технологий, а также для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки магистров «Теплоэнергетика и теплотехника», «Энергетическое машиностроение», «Ядерная энергетика и теплофизика», «Техническая физика», «Двигатели летательных аппаратов», и аспирантов, обучающихся по направлениям подготовки «Электро- и теплотехника», «Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии», «Физико-технические науки и технологии», «Авиационная и ракетно-космическая техника».

**ББК 31.31я73**

**Рецензенты:**

**Ю. Ф. ГОРТЫШОВ** — доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и энергомашиностроения Казанского научно-исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева;  
**А. С. МЯКОЧИН** — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой авиационно-космической теплотехники Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Обложка**  
**Е. А. ВЛАСОВА**

© Издательство «Лань», 2018  
© Н. М. Цирельман, 2018  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	8
Часть I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА .....	11
Раздел А. НЕКЛАССИЧЕСКИЙ ВАРИАЦИОННЫЙ ПРИНЦИП В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА .....	11
1. ВАРИАЦИОННОЕ ОПИСАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛА ТИПА СВЕРТКИ .....	12
1.1. Построение функционала типа свертки .....	12
1.2. Получение системы уравнений Эйлера .....	23
1.3. Решение системы уравнений Эйлера при построении первого и второго приближений .....	26
2. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОУДАЧИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБАХ НЬЮТОНОВСКОЙ И НЕНЬЮТОНОВСКОЙ СРЕДЫ .....	28
2.1. Решение задачи для ламинарного течения при полиномиальной аппроксимации ТФХ среды .....	28
2.2. Решение прикладных задач конвективного теплообмена при ламинарном течении .....	34
2.3. Влияние реологических свойств среды на теплообмен .....	47
3. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОУДАЧИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ (ГАЗА) В ПЕРЕХОДНОМ И ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМАХ .....	49
4. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ НЕСТАБИЛИЗИРОВАННОМ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ СЛОЖНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ .....	55
4.1. Постановка задачи и построение ее вариационного описания .....	55
4.2. Система уравнений Эйлера .....	57
4.3. Теплообмен в плоском канале .....	59
5. ПОСТАНОВКА СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛЕ И ПОСТРОЕНИЕ ЕЕ ВАРИАЦИОННОГО ОПИСАНИЯ ...	65
6. СТАЦИОНАРНЫЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ В НАПРАВЛЕНИИ ТЕЧЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ .....	69
6.1. Вариационное решение задачи конвективного теплообмена при «выпрямлении» ограничивающей поверхности канала .....	70
6.2. Симметризация закона изменения площади поперечного сечения по длине канала .....	80

Раздел Б. МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА .....	89
7. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ В КАНАЛЕ.....	89
7.1. Нестационарный теплообмен при стержневом течении .....	89
7.2. Определение среднерасходной температуры потока в канале со сложным поперечным сечением .....	98
7.3. Нестационарный теплоперенос при переменном расходе движущейся среды .....	105
Список литературы к части I .....	109
Часть II. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ .....	113
8. АНАЛИЗ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ .....	113
8.1. Взаимосвязь детальных и интегральных характеристик тепломаассопереноса в потоках жидкости (газа) .....	113
8.2. Физические условия подобия и моделирование процессов тепломаассопереноса .....	123
9. УСТАНОВЛЕНИЕ ВИДА ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА....	144
9.1. Структура уравнений подобия для описания вынужденного течения жидкости (газа) .....	144
9.2. Структура уравнений подобия для описания теплообмена при вынужденной и термической свободной конвекции .....	147
9.3. Структура уравнений подобия для описания массообмена при вынужденной и свободной диффузионной конвекции .....	153
9.4. Учет необходимых условий подобия процессов тепломаассопереноса в структуре уравнений подобия .....	156
10. ВЗАИМОСВЯЗЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА .....	158
10.1. Сравнительный анализ интегральных характеристик стабилизированного переноса количества движения и теплоты в канале .....	158
10.2. Аналогия физически однородных процессов .....	165
11. О НОВОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ УРАВНЕНИЙ ПОДОБИЯ .....	171
12. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПОДОБИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА .....	179
12.1. Математическая модель и подобие .....	179
12.2. Анализ фундаментального уравнения математической модели движения жидкости (газа) .....	182
12.3. Анализ фундаментального уравнения математической модели переноса теплоты в движущейся среде .....	189

12.4. Анализ условий однозначности решения краевых задач гидромеханики и конвективного теплообмена .....	193
12.5. Обоснование полной структуры уравнений подобия .....	198
12.6. Анализ сопряженной задачи нестационарного теплообмена (пример применения теории) .....	204
<b>13. МЕТОД АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ</b> .....	211
13.1. Метод анализа размерностей и $\pi$ -теорема Бэкингема .....	211
13.2. О некоторой детализации метода анализа размерностей .....	218
Список литературы к части II .....	225
<b>Часть III. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ</b> .....	227
<b>14. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ИХ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ</b> .....	227
14.1. Аналитическое решение линейной одномерной ОЗТ на основе преобразования Лапласа .....	228
14.2. Восстановление граничных условий на основе приближенного аналитического решения линейной одномерной ОЗТ .....	233
14.3. Приближенное аналитическое решение одномерной нелинейной граничной ОЗТ .....	239
14.4. Восстановление граничных условий из решения двумерной нелинейной обратной задачи теплопроводности .....	242
14.5. Решение граничной обратной задачи теплопроводности в диске .....	249
14.6. Идентификация параметров граничных условий теплообмена для полого цилиндра ограниченной длины .....	254
<b>15. ПРИЛОЖЕНИЯ РЕШЕНИЙ ОЗТ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</b> .....	264
15.1. Идентификация граничных условий на элементах проточной части ГТД .....	264
15.2. Идентификация температуры контакта формы с отливкой....	270
15.3. Идентификация температурной зависимости коэффициента теплопроводности литейных форм .....	275
Список литературы к части III .....	280
<b>Часть IV. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА</b> .....	283
<b>16. ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ГРАДИЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ</b> .....	287
16.1. Уравнения динамического пограничного слоя .....	287

16.2. Течение при положительном градиенте давления (в диффузорах) .....	289
16.3. Течение в поле отрицательного градиента давления (в конфузорах) .....	299
16.4. Картины генерации и подавления турбулентности при градиентных течениях .....	300
16.5. Теплообмен при градиентных течениях .....	304
16.6. Течение и теплообмен в поле продольного знакопеременного градиента давления .....	308
16.7. Обобщение результатов исследований гидродинамики и теплообмена градиентных течений .....	310
<b>17. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ</b> .....	314
17.1. Экспериментальная установка .....	314
17.2. Техника измерений .....	319
17.3. Методика эксперимента и обработки опытных данных .....	321
17.4. Определение достоверности экспериментальных данных .....	327
17.5. Систематические погрешности эксперимента .....	329
<b>18. ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ТИПА ДИФФУЗОР – КОНФУЗОР</b> .....	332
18.1. Распределение статического давления .....	332
18.2. Тепловая стабилизация .....	341
18.3. Качественная картина изменения интенсивности теплообмена по длине канала .....	350
18.4. Визуализация течений в каналах типа диффузор – конфузор ....	360
18.5. Распределение скорости и температуры .....	364
<b>19. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ДИФФУЗОР – КОНФУЗОР</b> .....	369
19.1. К вопросу об определении эффективности теплообменных поверхностей .....	369
19.2. Несимметричные течения при постоянной длине диффузоров .....	374
19.3. Несимметричные течения при постоянной длине конфузоров ...	384
19.4. Несимметричные и симметричные течения в каналах диффузор – конфузор .....	389
19.5. Теплообмен и гидродинамическое сопротивление при турбулентном течении газа в поле пространственного знакопеременного градиента давления .....	394
19.6. Течение в поле продольного знакопеременного градиента давления в развитых поверхностях теплообмена .....	401
19.7. Интенсификация теплообмена в профилированных трубах ...	405
19.8. К вопросу о методах обобщения опытных данных по теплообмену и сопротивлению при градиентных течениях ...	409

19.9. Влияние особенностей обработки экспериментальных данных .....	416
<b>20. ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРАДИЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ .....</b>	<b>423</b>
20.1. Сопротивление и теплообмен в конфузорах .....	423
20.2. Теплообмен в диффузорах .....	427
20.3. Теплообмен в каналах диффузор – конфузор .....	429
20.4. Сопротивление при течениях в каналах диффузор – конфузор .....	431
<b>21. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛЕ С ВИНТОВОЙ ВОЛНООБРАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ....</b>	<b>434</b>
Список литературы к части IV .....	442
Приложение 1. О возможности точной оценки приближений при использовании функционала типа свертки .....	453
Приложение 2. Решение задачи Коши для системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами .....	457
Приложение 3. Вычисление первой вариации функционала при построении вариационного описания нестационарного теплообмена .....	461
Приложение 4. Вычисление первой вариации функционала при построении вариационного описания сопряженной задачи теплообмена в канале .....	466