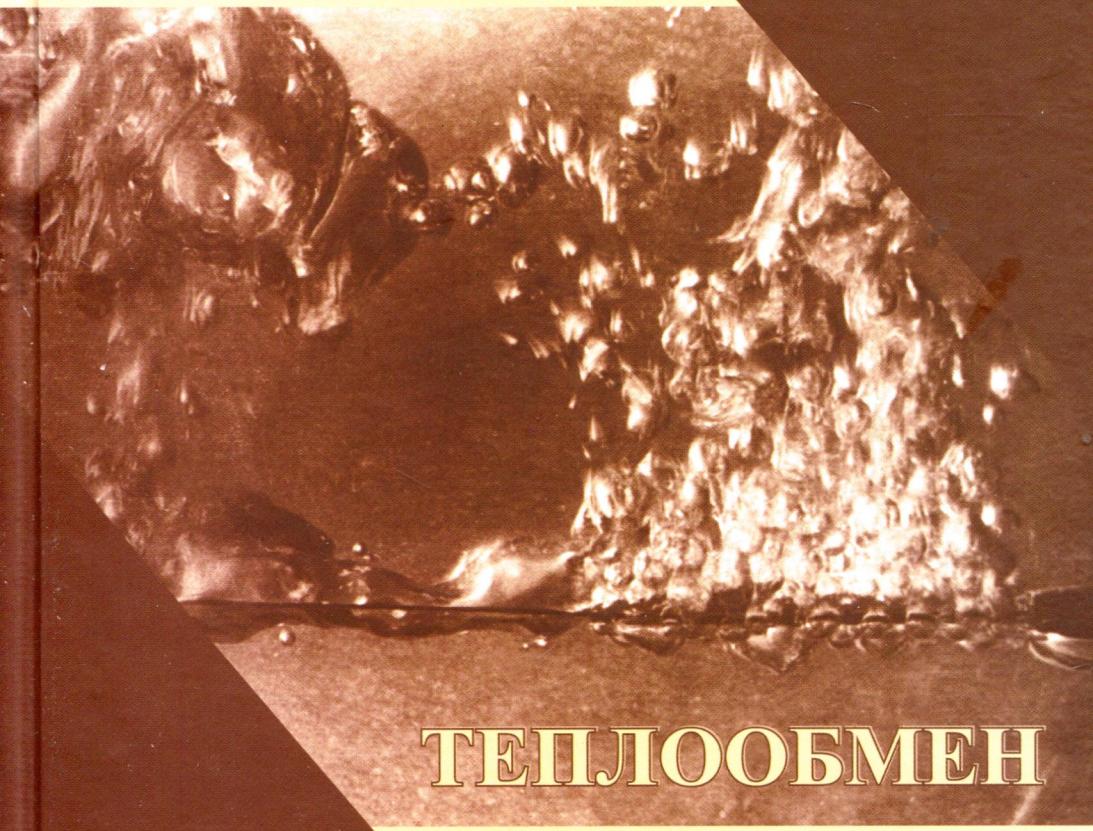
И. И. Гогонин



ТЕПЛООБМЕН

ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ

2018

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С. С. КУТАТЕЛАДЗЕ

И. И. Гогонин

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ

НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
2018

УДК 536.2
ББК 31.31
Г58

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 18-18-00023, не подлежит продаже

Гогонин И. И. Теплообмен при пузырьковом кипении / И. И. Гогонин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2018. — 227 с.

Процесс теплообмена при кипении оказался настолько сложным, что до настоящего времени не создано математической модели, удовлетворительно описывающей результаты экспериментов. Задача автора заключалась в описании принципиальных достижений в исследованиях теплообмена при кипении, выполненных в последние десятилетия различными исследователями. Экспериментально доказано, что теплообмен при кипении — задача с сопряженными граничными условиями. Интенсивность теплообмена зависит как от физических свойств теплоносителя, так и от физических свойств охлаждаемой стенки и ее геометрических параметров. В число определяющих параметров критериальной зависимости включены безразмерная толщина стенки, безразмерная шероховатость, отношение физических свойств жидкости к свойствам охлаждаемой стенки.

Впервые выполнен анализ грубых методических ошибок в экспериментальных исследованиях разных авторов. Выбор наиболее достоверных данных разных исследователей, а также опыты, выполненные в Институте теплофизики СО РАН с участием автора, послужили основой для приведенных обобщенных зависимостей и выяснения влияния каждого из определяющих параметров при его изменении.

Впервые показано, что при кризисе теплообмена критерий устойчивости зависит от физических свойств теплоносителя, его безразмерной толщины стенки и безразмерного диаметра. Приведена карта, позволившая обобщить огромный массив экспериментальных данных насыщенной и подогретой жидкости. На тонкостенном нагревателе критический тепловой поток многократно уменьшается.

При орошении пленкой пакета горизонтальных труб, расположенных одна под другой, невозможно получить ламинарное течение пленки из-за возникновения сухих пятен. Теплообмен при кипении всегда сопровождается теплообменом при испарении. При орошении пакета оребренных труб гидродинамика течения пленки существенным образом зависит от сил поверхностного натяжения. Характерным линейным размером становится высота ребра. Это приводит к интенсификации теплоотдачи при испарении и кипении пленки. Оребрение труб пакета обеспечивает равномерное орошение пакета горизонтальных труб.

В работе приведены расчетные зависимости или изложены алгоритмы расчета теплоотдачи в исследуемых процессах.

Монография соответствует мировому уровню и предназначена для ученых, исследующих кипение, для преподавателей вузов, аспирантов, студентов, для конструкторских организаций, рассчитывающих аппараты с кипящим теплоносителем.

Рецензенты:
д-р техн. наук, профессор П. Л. Кириллов
чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук А. Н. Павленко
д-р физ.-мат. наук Е. А. Чиннов

Утверждено к печати
Ученым советом Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

ISBN 978-5-7692-1589-6

© Издательство СО РАН, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Принятые обозначения 3

Предисловие 7

Введение 9

Глава 1
Анализ характерных методических ошибок в экспериментальных исследованиях теплообмена при кипении в условиях свободной конвекции 13
1.1. Экспериментальные стенды 14
1.2. Методика проведения опытов для определения коэффициента теплоотдачи при кипении в условиях свободной конвекции 18
1.2.1. Общие положения ..... –
1.2.2. Методика определения температуры охлажденной стенки 19
1.2.3. Недостаточность объема экспериментального сосуда ... 20
1.3. Термостатирование рабочего объема ..... –
1.4. Относительная длина экспериментального участка 24
1.5. Гистерезис при увеличении и снижении теплового потока 25
1.6. Кратковременное пленочное кипение 27
1.7. Экспериментальное исследование на тонкостенных нагревателях 28
1.8. Химическая чистота теплоносителя 30
1.9. Удаление воздуха, растворенного в воде 32
Список литературы 34

Глава 2
Теплообмен при кипении в условиях свободной конвекции 38
2.1. Теплообмен при пузырьковом кипении ..... –
2.2. Механизм теплоотдачи при кипении 42
2.3. Измерение флуктуаций температуры стенки при пузырьковом кипении 44
2.4. Критический радиус пузыря 46

2.5. Отрывной диаметр парового пузыря 47
2.6. Глубина захолаживания 52
2.7. Влияние материала стенки на теплообмен при кипении 54
2.8. Влияние шероховатости стенки 55
Список литературы 58

Глава 3
ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ: КРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ 61
3.1. Приближенная теория теплообмена при пузырьковом кипении Д. А. Лабунцова 62
3.2. Влияние параметров стенки на теплообмен при кипении 66
3.2.1. Влияние свойств теплоотдающей стенки ..... –
3.2.2. Глубина захолаживания 70
3.2.3. Влияние шероховатости стенки 71
Список литературы 74

Глава 4
НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ 79
4.1. Теплообмен при кипении жидкостей на оребренной стенке ..... –
4.2. Теплообмен при кипении на пористых поверхностях 85
4.3. Расчетные зависимости для определения теплоотдачи при кипении на пористых поверхностях 90
4.4. Влияние краевого угла смачивания на теплоотдачу при кипении 91
Список литературы ..... –

Глава 5
КРИТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ПРИ КИПЕНИИ И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООТДАЮЩЕЙ СТЕНКИ 101
5.1. Основные положения гидродинамической теории кризиса теплообмена при кипении С. С. Кутателадзе ..... –
5.2. Анализ экспериментальных данных 103
5.3. Влияние физических свойств жидкости на критический тепловой поток 111
5.4. Влияние толщины теплоотдающей стенки на критический тепловой поток при кипении 113
5.5. Независимость критического теплового потока от безразмерного комплекса $\left(\frac{\lambda C\rho}{\lambda_w C_w \rho_w}\right)$ 115
5.6. Зависимость критического теплового потока от размера теплоотдающей стенки 116
5.7. Влияние недогрева жидкости на критический тепловой поток 122
Список литературы ..... –

Глава 6
Теплообмен при кипении смесей в условиях свободной конвекции 134
6.1. Анализ экспериментальных данных при кипении бинарных смесей ..... –
6.2. Обработка данных в безразмерных координатах 138
Список литературы 142

Глава 7
Критический тепловой поток при кипении бинарных водно-спиртовых смесей 144
7.1. Результаты экспериментальных исследований ..... –
7.2. Обобщение экспериментальных данных 150
Список литературы 152

Глава 8
Теплообмен при испарении и кипении пленки, орошающей пучок горизонтальных труб 154
8.1. Влияние физических и гидродинамических условий на теплообмен в пленочных течениях ..... –
8.2. Теплообмен при испарении и кипении пленки, движущейся под действием силы тяжести 159
8.3. Теплообмен при кипении в пленке при развитом пузырьковом кипении 164
8.4. Особенности гидродинамики пленочного течения, орошающего пучок оребренных труб 169
8.5. Теплообмен при испарении и кипении пленки жидкости, орошающей пучок оребренных труб 171
8.6. Стенд с вынужденной циркуляцией для исследования теплообмена при испарении и кипении пленки, орошающей пучок труб 174
8.7. Теплообмен при испарении и кипении на пучке шероховатых труб 179
8.8. Влияние микрооребрения на гидродинамику и теплообмен 180
8.8.1. Влияние спутного потока пара 181
Список литературы ..... –

Глава 9
Критические режимы в пленочных течениях 186
9.1. Образование «сухих» пятен при орошении вертикальной трубы ..... –
9.2. Результаты экспериментального исследования 188
9.3. Неустойчивость пленочного течения при орошении пакета горизонтальных труб 193
9.4. Способы стабилизации пленки, орошающей пакет горизонтальных труб 196
Список литературы ..... –

Глава 10
Теплообмен при кипении жидкости внутри труб 199
10.1. Структура парожидкостных потоков ..... –
10.2. Зависимость теплоотдачи от относительной энтальпии потока 202
10.3. Расчет теплоотдачи при кипении в условиях вынужденной конвекции в трубах 204
Список литературы ..... –

Глава 11
Предельные гидродинамические и тепловые параметры в парогенераторах погружного типа 209
11.1. Расчет предельного значения удельного теплового потока ..... –
11.2. Выбор предельных значений скорости пара в парогенераторе погружного типа 212
11.3. Унос канальной влаги паром 214
11.4. Количественные зависимости по капельному уносу 216
Список литературы ..... –

Заключение 220