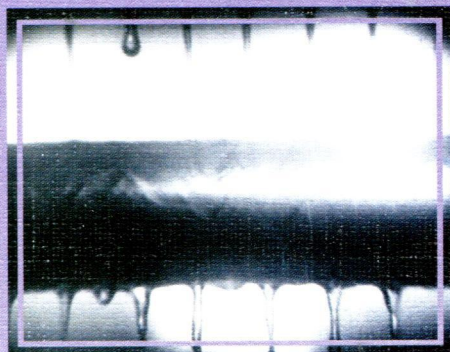
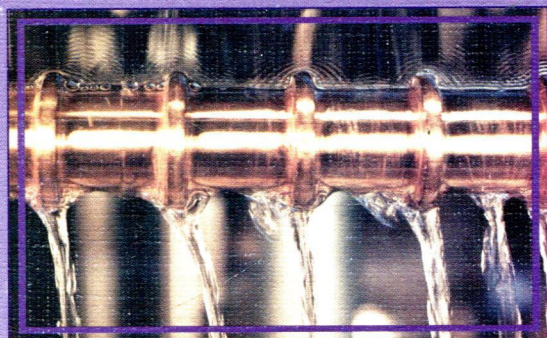


**И.И. Гогонин**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА  
ПРИ  
ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА**



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

**И.И. Гогонин**

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕПЛООБМЕНА  
ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ  
КОНДЕНСАЦИИ ПАРА**

Ответственный редактор  
член-корреспондент РАН *С.В. Алексеенко*



НОВОСИБИРСК  
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
2015

УДК 536.2  
ББК 31.31  
Г58

Рецензенты:

д-р техн. наук *А.П. Солодов*  
д-р физ.-мат. наук *И.В. Марчук*

**Гогонин, И.И.**

Исследование теплообмена при пленочной конденсации пара / И.И. Гогонин; отв. ред. С.В. Алексеенко; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. – 236 с.

В монографии представлены результаты новых экспериментальных данных по теплообмену при конденсации неподвижного и движущегося пара в широких пределах исследуемых параметров: плотности и скорости пара, тепловых потоков, плотности орошения, геометрических характеристик экспериментальных участков, в том числе оребренных. Приведены обобщения и объяснения с единой точки зрения. Выполнено сравнение результатов эксперимента с известными теоретическими и экспериментальными данными других авторов. Впервые показаны принципиальные отличия в механизме передачи тепла на вертикальной поверхности и пакете горизонтальных труб, расположенных в вертикальный ряд. Анализ тепломассообмена при конденсации парогазовых смесей выполнен на основании численного решения уравнений для парогазовой смеси, представленного в работе E. Sparrow, M. Minkowycz, M. Saddy [7.42]. Принципиально новым приложением этого анализа является использование конденсатора в качестве экологического устройства для очистки парогазовых выбросов. Подробное описание экспериментальных стендов и методики проведения опытов, по мнению автора, призвано убедить читателя в достоверности представленных экспериментальных данных.

Монография представляет интерес для научных сотрудников, занимающихся вопросами теплообмена при фазовых превращениях, для инженеров, энергетиков, для специалистов химической технологии нефтепереработки и холодильной техники. Экспериментальные результаты могут быть использованы как тестовые при отработке программ для численных решений задач.

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

ISBN 978-5-7692-1455-4

© Гогонин И.И., 2015  
© Издательство СО РАН, 2015

---

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	7
<b>Глава 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НЕПОДВИЖНОГО ПАРА .....</b>	<b>11</b>
1.1. Теория пленочной конденсации Нуссельта .....	–
1.2. Конденсация неподвижного пара на одиночном горизонтальном цилиндре .....	13
1.3. Влияние конвективного переноса и инерционных сил. ....	15
1.4. Теплообмен при турбулентном течении пленки на вертикальной поверхности при медленном движении пара .....	17
1.5. Экспериментальные исследования теплообмена при конденсации неподвижного пара на вертикальных поверхностях .....	26
1.6. Теплообмен при конденсации неподвижного пара на пакетах горизонтальных труб .....	30
1.7. Экспериментальные исследования теплообмена при конденсации неподвижного пара на одиночных горизонтальных цилиндрах и пакетах горизонтальных труб	31
1.8. Методические ошибки в экспериментальных исследованиях теплообмена при конденсации .....	33
Список литературы .....	45
<b>Глава 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....</b>	<b>51</b>
2.1. Выбор рабочих веществ. Теплофизические свойства хладонов .....	–
2.2. Стенд с естественной циркуляцией для исследования теплообмена на горизонтальных трубах .....	53
2.3. Стенд с естественной циркуляцией для исследования теплообмена на вертикальных трубах .....	55
2.4. Стенд с вынужденной циркуляцией .....	56
2.5. Методика и схема измерений .....	60
2.6. Методика измерения температуры жидкости в межтрубном пространстве .....	62



2.7. Стенд для моделирования процесса конденсации. Методика проведения опытов по капиллярному удерживанию жидкости на оребренных цилиндрах .....	64
Список литературы .....	66
<b>Глава 3. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПРАКТИЧЕСКИ НЕПОДВИЖНОГО ПАРА .....</b>	<b>68</b>
3.1. Теплообмен при конденсации пара на вертикальных трубах	–
3.2. Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований .....	70
3.3. Конденсация неподвижного пара на одиночном горизонтальном цилиндре .....	79
3.4. Теплообмен при конденсации неподвижного пара на пакете горизонтальных труб .....	84
Список литературы .....	97
<b>Глава 4. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПАРА .....</b>	<b>101</b>
4.1. Расчет теплообмена при конденсации движущегося пара.....	–
4.2. Экспериментальные исследования при конденсации движущегося пара на одиночном цилиндре .....	106
4.3. Теплообмен при пленочной конденсации движущегося пара на пакетах горизонтальных труб .....	112
Список литературы .....	118
<b>Глава 5. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА ПАКЕТАХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ</b>	<b>121</b>
5.1. Виды оребрения .....	–
5.2. Теплообмен при конденсации неподвижного пара на одиночном оребренном цилиндре .....	123
5.3. Влияние плотности орошения на теплообмен при конденсации пара на пакетах оребренных труб .....	130
5.4. Теплообмен при конденсации движущегося пара на оребренных трубах .....	139
Список литературы .....	145
<b>Глава 6. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПАРА ВНУТРИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБ .....</b>	<b>148</b>
6.1. Зависимости, обобщающие экспериментальные данные .....	150
6.2. Теплообмен при конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности .....	156
6.3. Анализ экспериментальных данных при конденсации пара в трубах .....	158
6.4. Влияние уноса на теплообмен .....	164
Список литературы .....	167

Глава 7. ТЕПЛО- И МАССООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ .....	172
7.1. Анализ и обобщение экспериментальных данных при конденсации пара из парогазовой смеси на трубах и пакетах труб .....	–
7.2. Конденсация неподвижного пара из парогазовой смеси.....	190
7.3. Конденсация пара из движущейся парогазовой смеси на плоской стенке .....	191
7.4. Конденсация пара из движущейся парогазовой смеси при поперечном обтекании цилиндра .....	193
7.5. Сопоставление расчета с экспериментальными данными при конденсации пара из парогазовых смесей на одиночном горизонтальном цилиндре .....	196
7.6. Конденсация пара из парогазовой смеси при поперечном обтекании пакета горизонтальных труб .....	199
7.6.1. Расчет изменения давления, скорости парогазовой смеси и концентрации неконденсируемой примеси по глубине пакета .....	200
7.7. Расчет локальных характеристик тепломассообмена и теплообменной поверхности конденсатора .....	202
7.7.1. Схема и алгоритм расчет .....	–
7.7.2. Теплоотдача к охлаждающей воде .....	203
7.7.3. Теплопередача .....	204
7.7.4. Теплообменная поверхность конденсатора.....	205
7.7.5. Вывод основных параметров .....	–
7.7.6. Свойства охлаждающей воды и конденсата.....	–
Список литературы .....	208
Глава 8. КОНДЕНСАТОР КАК ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЧИСТКИ ПАРОГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ .....	213
8.1. Особенности гидрогазодинамики двухфазного потока в вытяжной трубе .....	214
8.2. Конденсатор – экологическое устройство .....	216
8.3. Методика измерений.....	218
8.4. Результаты опытов .....	220
Список литературы .....	224
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	226

---

---

# CONTENTS

PREFACE .....	6
INTRODUCTION .....	7
Chapter 1. STUDY OF HEAT TRANSFER AT CONDENSATION OF IMMOBILE VAPOR .....	11
1.1. Nusselt theory of film condensation .....	–
1.2. Condensation of immobile vapor on a single horizontal cylinder .....	13
1.3. Influence of convective transfer and inertia forces .....	15
1.4. Heat transfer at the turbulent film flow on a vertical surface at slow vapor motion .....	17
1.5. Experimental studies of heat transfer at condensation of immobile vapor on the vertical surfaces .....	26
1.6. Heat transfer at condensation of immobile vapor on the horizontal tube bundles .....	30
1.7. Experimental studies of heat transfer at condensation of immobile vapor on the single horizontal cylinders and horizontal tube bundles .....	31
1.8. Methodological errors in experimental studies of heat transfer at condensation .....	33
References .....	45
Chapter 2. EXPERIMENTAL SETUPS AND PROCEDURES .....	51
2.1. Selection of working substances. Thermal-physical properties of refrigerants .....	–
2.2. Setup with natural circulation for studying heat transfer on horizontal tubes .....	53
2.3. Setup with natural circulation for studying heat transfer on vertical tubes .....	55
2.4. Setup with forced circulation .....	56
2.5. Methods and scheme of measurements .....	60
2.6. Procedure of liquid temperature measurements in-between the tubes .....	62

2.7. Setup for modeling the condensation process.	
Methods of experiments on capillary liquid retention on the ribbed cylinders .....	64
References .....	66
<b>Chapter 3. HEAT TRANSFER AT CONDENSATION OF ALMOST IMMOBILE VAPOR .....</b>	<b>68</b>
3.1. Heat transfer at vapor condensation on vertical tubes .....	–
3.2. Analysis and generalization of experimental results .....	70
3.3. Condensation of immobile vapor on a single horizontal cylinder .....	79
3.4. Heat transfer at condensation of immobile vapor on a bundle of horizontal tubes .....	84
References .....	97
<b>Chapter 4. HEAT TRANSFER AT CONDENSATION OF MOVING VAPOR .....</b>	<b>101</b>
4.1. Calculation of heat transfer at condensation of moving vapor	–
4.2. Experimental studies with condensation of moving vapor on a single cylinder .....	106
4.3. Heat transfer at film condensation of moving vapor on the bundles of horizontal tubes .....	112
References .....	118
<b>Chapter 5. HEAT TRANSFER AT VAPOR CONDENSATION ON THE BUNDLES OF HORIZONTAL RIBBED TUBES ...</b>	<b>121</b>
5.1. Types of ribbing .....	–
5.2. Heat transfer at condensation of immobile vapor on a single ribbed cylinder .....	123
5.3. The effect on irrigation density on heat transfer at vapor condensation on the bundles of ribbed tubes .....	130
5.4. Heat transfer at condensation of moving vapor on the ribbed tubes .....	139
References .....	145
<b>Chapter 6. HEAT TRANSFER AT CONDENSATION OF MOVING VAPOR INSIDE THE VERTICAL TUBES INTRODUCTION .....</b>	<b>148</b>
6.1. Dependences generalizing experimental data .....	150
6.2. Heat transfer at condensation of immobile vapor on a vertical surface .....	156
6.3. Analysis of experimental data at vapor condensation in tubes	158
6.4. The effect of entrainment on heat transfer .....	164
References .....	167



Chapter 7. HEAT AND MASS TRANSFER AT VAPOR CONDENSATION FROM THE GAS-VAPOR MIXTURE ....	172
7.1. Analysis and generalization of data at vapor condensation from the gas-vapor mixture on tubes and tube bundles .....	–
7.2. Condensation of immobile vapor from the gas-vapor mixture	190
7.3. Condensation of vapor from the moving gas-vapor mixture on a flat wall .....	191
7.4. Condensation of vapor from the moving gas-vapor mixture at a transverse flow around a cylinder .....	193
7.5. Comparison of calculated and experimental data on vapor condensation from the gas-vapor mixtures on a single horizontal cylinder .....	196
7.6. Condensation of vapor from the gas-vapor mixture at a transverse flow around a bundle of horizontal tubes .....	199
7.6.1. Calculation of a change in pressure, velocity of the gas-vapor mixture and concentration of non-condensing gas-vapor mixture along the bundle depth .....	200
7.7. Calculation of local characteristics of heat and mass transfer and heat-exchanging surface of a condenser .....	202
7.7.1. Calculation scheme and algorithm .....	–
7.7.2. Heat transfer to cooling water .....	203
7.7.3. Heat transfer .....	204
7.7.4. Heat- exchanging surface of a condenser .....	205
7.7.5. Information output .....	–
7.7.6. Properties of cooling water and condensate .....	–
References .....	208
Chapter 8. CONDENSER AS AN ENERGY-SAVING AND ENVIRONMENTAL DEVICE FOR CLEANING THE GAS-VAPOR EMISSIONS INTRODUCTION .....	213
8.1. Features of fluid dynamics of the two-phase flow in an exhaust pipe .....	214
8.2. Condenser – environmentally responsible device .....	216
8.3. Measurement methods .....	218
8.4. Experimental results .....	220
References .....	224
CONCLUSIONS .....	226