

В.И. ТЕРЕХОВ, М.А. ПАХОМОВ

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС И ГИДРОДИНАМИКА В ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ПОТОКАХ

Монография

НОВОСИБИРСК
2009

УДК 536.24 + 532.5
Т 35

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук *О.Н. Кашинский*
д-р техн. наук, проф. *В.Н. Ярыгин*
д-р техн. наук, проф. *Ю.В. Овчинников*

Терехов В.И.

Т 35 Теплоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках : монография / В.И. Терехов, М.А. Пахомов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – 284 с. (серия «Монографии НГТУ»). ISBN 978-5-7782-1157-5

Рассмотрены вопросы численного моделирования гидродинамики и теплопереноса в двухфазных газокapельных потоках при обтекании плоской пластины, течения в трубе, в пристенной и затопленной струях. Для всех рассматриваемых случаев проведены детальные численные расчеты и определен вклад испарительных процессов в интенсификацию теплообмена. Дается сопоставительный анализ с известными в литературе опытными и расчетными данными по теплообмену в газокapельных потоках. Эти данные также могут быть использованы для анализа интенсификации теплопереноса в теплообменных аппаратах различного назначения, работающие как в ламинарном, так и турбулентном режимах течения.

Разработанные модели и полученные результаты будут весьма полезны в инженерных приложениях при разработке новых методов регулирования теплообмена и сопротивления в проточных трактах энергетических установок.

Адресована научным работникам, занимающимся исследованиями газодинамики и теплопереноса в многофазных потоках, а также преподавателям, аспирантам и студентам высших учебных заведений.

УДК 536.24 + 532.5

ISBN 978-5-7782-1157-5

© Терехов В.И., Пахомов М.А., 2009
© Новосибирский государственный
технический университет, 2009

V.I. TEREKHOV, M.A. PAKHOMOV

FLOW DYNAMICS AND HEAT AND MASS TRANSFER IN A GAS-DROPLETS FLOWS

Monograph

NOVOSIBIRSK
2009

UDC 536.24 + 532.5
T 35

Reviewers: Prof. *O.N. Kashinsky*
Prof. *V.N. Yarygin*
Prof. *Yu.V. Ovchinnikov*

Terekhov V.I.

T 35 Flow dynamics and heat and mass transfer in a gas-droplets flows : monograph / V.I. Terekhov, M.A. Pakhomov. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2009. – 284 pp. (“NSTU Monographs” series).

ISBN 978-5-7782-1157-5

The monograph has to do with the issues of numerical modeling of hydrodynamics and heat and mass transfer in two-phase gas-drop flows at flat plate flow, flow in the pipe, in wall and submerged jet. For all considered cases detailed numerical calculations have been made and contribution of evaporation processes into heat transfer intensification has been determined. Comparative analysis with experimental and computational data on heat and mass transfer in gas-droplets flows presented in the publications is carried out. These results can be also used for the analysis of intensification of heat and mass transfer in various heat exchangers operating both in laminar and turbulent flow modes.

Developed models and obtained data will be extremely useful for engineering applications at the development of new methods of heat transfer regulation and resistance in flowing channels of power plants.

For research workers studying gas dynamics and heat and mass transfer in multiphase flows, lecturers, post-graduates and university students.

UDC 536.24 + 532.5

ISBN 978-5-7782-1157-5

© Terekhov V.I., Pakhomov M.A., 2009
© Novosibirsk State Technical University, 2009

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	7
Библиографический список к введению	10
<i>Глава 1.</i> КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ДВУХФАЗНЫХ ЛАМИНАРНЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ.....	13
1.1. Примеры двухфазных течений	13
1.2. Основные параметры двухфазных потоков.....	16
1.3. Классификация двухфазных течений.....	21
1.4. Методы математического моделирования двухфазных течений	22
1.5. Лагранжев подход при моделировании движения и теплообмена час- тицы.....	23
1.6. Эйлеров (двухжидкостный) подход для описания движения и тепло- переноса частицы.....	43
1.7. Тепломассообмен частицы с окружающим потоком газа	46
1.8. Методы прямого численного моделирования для двухфазных течений.....	51
Библиографический список к главе 1	52
<i>Глава 2.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ГИД- РОДИНАМИКИ В ЛАМИНАРНЫХ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЯХ	59
2.1. Особенности тепломассообмена в ламинарных двухфазных потоках при наличии испарения капель	59
2.2. Физическая модель задачи	64
2.3. Основные уравнения.....	66
2.4. Вычислительные процедуры	70
2.5. Тестирование расчетной модели	71

2.6. Численное исследование тепломассообмена при ламинарном течении газодапельной системы в трубе	73
2.7. Сопоставление с экспериментальными данными	80
2.8. Численное исследование теплообмена при ламинарном обтекании газопарадапельным потоком плоской изотермической пластины	83
Библиографический список к главе 2	97

Глава 3. ТЕПЛОМАССООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА ПРИ ТЕЧЕНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОДАПЕЛЬНОГО ПОТОКА В ТРУБЕ.....99

3.1. Основные параметры, влияющие на тепломассоперенос в двухфазных потоках с фазовыми переходами	99
3.2. Исследование динамики дисперсной фазы, их осаждения на стенку из двухфазного потока и влияния на структуру двухфазного течения... ..	102
3.3. Физическая модель	105
3.4. Основные уравнения математической модели для газовой фазы	106
3.5. Модели турбулентности	108
3.6. Система уравнений переноса дисперсной фазы.....	113
3.7. Граничные и входные условия	116
3.8. Вычислительные процедуры	118
3.9. Тестирование численной модели для турбулентных одно- и двухфазных течений	124
3.10. Численное моделирование теплообмена в турбулентном газодапельном потоке в трубе и анализ результатов расчетов.....	135
3.11. Сопоставление с экспериментальными данными для газодапельного турбулентного потока	154
Библиографический список к главе 3	157

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ГАЗОДАПЕЛЬНЫХ ПРИСТЕННЫХ СТРУЙ.....163

4.1. Эффективность одно- и двухфазных пристенных струй.....	163
4.2. Исследование газодапельной пристенной завесы над адиабатической поверхностью стенки трубы	168
4.3. Численное моделирование двухфазной завесы при наличии теплообмена со стенкой трубы.....	188
Библиографический список к главе 4	206

<i>Глава 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ СТРУЙ</i>	209
5.1. Введение	209
5.2. Современное состояние исследований двухфазных струй	210
5.3. Постановка задачи и основные уравнения газовой фазы	216
5.4. Метод численной реализации и тестирование модели	222
5.5. Сопоставление с экспериментальными данными для однофазной струи	229
5.6. Результаты численных расчетов газодисперсной турбулентной струи и их обсуждение	231
5.7. Сопоставительный анализ с данными для газодисперсной струи	238
5.8. Газокапельная струя при наличии фазовых переходов	250
5.9. Сопоставительный анализ для газокапельной струи	265
Библиографический список к главе 5	272

Contents

INTRODUCTION	7
References for Introduction	10
<i>Chapter 1.</i> SHORT INFORMATION ABOUT TWO-PHASE LAMINAR AND TURBULENT FLOWS.....	13
1.1. Examples of two-phase flows	13
1.2. Main parameters of two-phase flows	16
1.3. Classification of two-phase flows	21
1.4. Methods of mathematical modeling of two-phase flows	22
1.5. Lagrangian description for modeling of particle fluid dynamics and heat transfer	23
1.6. Eulerian (two-fluid) description for behavior of particle fluid dynamics and heat transfer	43
1.7. Heat and mass transfer of single particle with ambient gas stream.....	46
1.8. Methods of DNS and LES for two-phase flows.....	51
References for Chapter 1	52
<i>Chapter 2.</i> MODELING OF FLOW DYNAMICS AND HEAT AND MASS TRANSFER IN LAMINAR GAS-DROPLETS FLOWS	59
2.1. Peculiarities of the heat and mass transfer in laminar gas-droplets flows.....	59
2.2. Physical model	64
2.3. Governing equations	66
2.4. Numerical realization.....	70
2.5. Testing of the numerical model	71
2.6. Numerical study of heat and mass transfer in laminar gas-droplets flow in a tube.....	73

2.7. Comparison of experimental data for tube flow with numerical results	80
2.8. Numerical investigation of heat transfer in the laminar gas/vapor/droplets stream over an isothermal flat plate	83
References for Chapter 2	97

Chapter 3. FLOW DYNAMICS AND HEAT AND MASS TRANSFER IN A TURBULENT GAS-DROPLETS FLOW IN A TUBE.....

3.1. Main characteristics effected on the heat and mass transfer in a two-phase flows with phase changes	99
3.2. Modeling of dynamics of the dispersed phase	102
3.3. Physical model	105
3.4. Governing equations for the gas phase	106
3.5. Two-equations turbulence models	108
3.6. Governing equations for the dispersed phase.....	113
3.7. Boundary conditions	116
3.8. Numerical procedures	118
3.9. Testing of the numerical model for turbulent one-phase and two-phase flows	124
3.10. Predictions of heat transfer in the turbulent gas-droplets tube flow and analysis of numerical results	135
3.11. Comparison with experimental data for gas-droplets turbulent flow in the tube.....	154
References for Chapter 3	157

Chapter 4. THE STUDY TURBULENT GAS-DROPLETS WALL JETS....

4.1. An effectiveness of one-phase and two-phase wall jets	163
4.2. The study of gas-droplets wall screen over adiabatic wall surface in a tube..	168
4.3. Numerical modeling of two-phase jet with heat transfer between wall surface and gas-droplets stream	188
References for Chapter 4	206

Chapter 5. THE STUDY TURBULENT GAS-DROPLETS WALL JETS....

5.1. Introduction.....	209
5.2. Review of two-phase jets	210
5.3. Problem statement.....	216

5.4. Numerical realization and model testing jet.....	222
5.5. Comparison with measurements results for one-phase turbulent jet.....	229
5.6. Predictions of gas-dispersed turbulent jet and its discussions.....	231
5.7. Comparative analysis with the experiments for gas-dispersed jet.....	238
5.8. Investigation of gas-droplets jet with phase changes	250
5.9. Comparison with measurements for the gas-droplets turbulent jet	265
References for Chapter 5	272