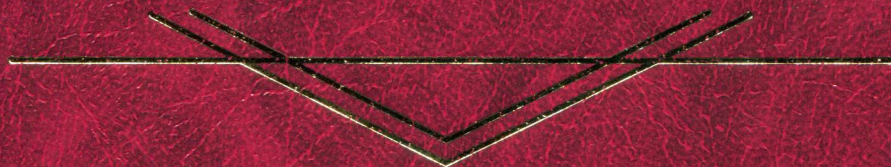


МОНОГРАФИИ НГТУ

ТЕПЛООБМЕН
В ДОЗВУКОВЫХ
ОТРЫВНЫХ ПОТОКАХ



ТЕПЛООБМЕН В ДОЗВУКОВЫХ ОТРЫВНЫХ ПОТОКАХ



**НОВОСИБИРСК
2 0 1 6**

УДК 533.6.011.32:536.2
Т 343

Коллектив авторов:

*В.И. Терехов, Т.В. Богатко, А.Ю. Дьяченко,
Я.И. Смольский, Н.И. Ярыгина*

Рецензенты:

*д-р техн. наук профессор В.В. Ларичкин,
член-корреспондент РАН С.В. Алексеенко*

Т 343 Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках: монография / колл. авторов; под редакцией В.И. Терехова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 247 с. (серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-3006-4

Представлены результаты экспериментального и численного исследования динамических и тепловых характеристик дозвуковых отрывных потоков, образующихся за различными преградами. Рассмотрены картины обтекания обратной ступеньки, одиночного ребра и прямоугольной каверны, являющиеся в настоящее время классическими задачами аэрогидродинамики и теплопереноса. Последовательно изучены более сложные случаи развития отрывных течений за преградами: обтекание ребра и системы ребер, расположенных под разными углами к направлению потока, ступеньки со скошенной обратной стенкой, каверн с наклонными стенками, а также отсоединенных ребер. Исследовано влияние различных факторов на динамику отрывного течения и турбулентный теплообмен.

Книга адресована научным работникам и инженерам, специализирующимся в области механики и теплофизики турбулентных течений, а также преподавателям, аспирантам и студентам высших учебных заведений.

УДК 533.6.011.32:536.2

ISBN 978-5-7782-3006-4

© Коллектив авторов, 2016
© Новосибирский государственный
технический университет, 2016

HEAT TRANSFER IN SUBSONIC SEPARATED FLOWS



NOVOSIBIRSK
2 0 1 6

УДК 533.6.011.32:536.2

T 343

Composite authors:

*V.I. Terekhov, T.V. Bogatko, A.Yu. Dyachenko,
Ya.I. Smulskiy, N.I. Yarygina*

Reviewers:

*V.V. Larichkin, Prof. D.Sc. (Eng.)
S.V. Alekseenko, Corresponding Member of RAS*

T 343 Heat Transfer in the Subsonic Separated Flows: monograph / composite authors: edited by V.I. Terekhov. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – 247 p. (“NSTU Monographs”series).

ISBN 978-5-7782-3006-4

The results of experimental and numerical studies of dynamic and thermal characteristics of the subsonic separated flow formed behind various obstacles are presented. The patterns of the flow around a back-facing step, a single rib, and a rectangular cavity, which are now a classical problem of aerodynamics and heat and mass transfer, are considered. More complicated cases of separated flow development behind the obstacles (flows around a rib or a rib system placed at different angles to the flow direction, a step with an inclined back wall, cavities with sloping walls, and disconnected ribs) were studied sequentially. The effect of various factors on the separated flow dynamics and turbulent heat transfer was investigated.

The book is addressed to scientists and engineers specializing in mechanics and thermal physics of turbulent flows as well as teachers and students of higher educational institutions.

УДК 533.6.011.32:536.2

ISBN 978-5-7782-3006-4

© Collective of authors, 2016
© Novosibirsk State
Technical University, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Список принятых обозначений	11
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ.....	15
1.1. Введение.....	15
1.2. Современный уровень в моделировании отрывных течений.....	16
1.3. Последние достижения в экспериментальном изучении отрыв- ных потоков	19
Глава 2. ОТРЫВ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ	29
2.1. Введение.....	29
2.2. Течение и теплообмен при ламинарном обтекании двумерных преград	31
2.3. Влияние динамической и тепловой предыстории на развитие ламинарного отрывного течения за уступом и каверной	37
2.4. Отрыв и повторное присоединение потока на проницаемой поверхности	44
Глава 3. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ ЗА СТУПЕНЬКОЙ И РЕБРОМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УРОВНЯ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	49
3.1. Экспериментальные методы исследования и установки	49
3.1.1. Аэродинамический стенд и модели для исследования течения за единичным ребром и уступом	49
3.1.2. Модель обтекания прямоугольной каверны с наклонными боковыми стенками.....	55
3.1.3. Экспериментальная база при измерении наклонного ребра и системы ребер.....	57
3.1.4. Основная измерительная аппаратура и методы обработки результатов	60



3.1.5. Метод трассерной визуализации	61
3.2. Теплообмен в отрывном течении за обращенной назад ступенькой при естественной и повышенной турбулентности основного потока	62
3.2.1. Динамика отрывного потока за уступами разной высоты	65
3.2.2. Теплоотдача в отрывном течении за уступом	70
3.3. Отрыв потока за уступом с наклонной стенкой	75
3.4. Влияние внешней турбулентности на динамические характеристики и интенсификацию теплообмена за единичным ребром	80
3.5. Влияние высоких близко расположенных ребер на теплообмен	92
Глава 4. ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН ЗА РЕБРАМИ, УСТАНОВЛЕННЫМИ ПОД УГЛОМ К ПОТОКУ	99
4.1. Развитие отрывного течения за ребром при варьировании угла атаки	99
4.2. Теплообмен в системе ребер, расположенных под углом к потоку	113
4.3. Обтекание системы ребер турбулизованными потоками	122
Глава 5. ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В КАВЕРНАХ	127
5.1. Трехмерная структура течения в кавернах	127
5.2. Каверны с наклонными стенками, особенности теплообмена	135
5.3. Влияние степени турбулентности набегающего потока на теплообмен в кавернах	143
5.4. Пассивное управление теплообменом внутри каверн	147
Глава 6. ВЛИЯНИЕ ОТРЫВНЫХ ЗОН НА ВИХРЕОБРАЗОВАНИЕ И ТУРБУЛЕНТНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В КРУГЛОЙ ТРУБЕ	155
6.1. Влияние динамической предыстории на теплообмен в отрывном потоке	155
6.2. Влияние тепловой предыстории на теплообмен при отрыве потока	162
6.3. Структура отрывного течения и теплообмен в зависимости от степени расширения трубы	168
6.4. Интенсификация теплообмена при обтекании преград различной формы	177
6.5. Теплогидравлическая эффективность отсоединенной диафрагмы в трубе	193
6.6. Отрывное течение в осесимметричном диффузоре после внезапного расширения трубы	205
Библиографический список	214

CONTENT

Foreword.....	7
Nomenclature.....	11
Chapter 1.STATE-OF-THE-ART IN HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANASFER OF SEPARATED FLOWS	15
1.1. Introduction	15
1.2. A modern level of separated flow simulation.....	16
1.3. Recent achievements in experimental investigation of separated flows	19
Chapter 2. SEPARATION OF A LAMINAR BOUNDARY LAYER	29
2.1. Introduction	29
2.2. Flow and heat transfer at laminar streamlining of 2-D obstacles	31
2.3. An effect of dynamic and thermal prehistory on the development of the laminar separated flow behind the step and the cavity	37
2.4. Flow separation and reattachment on a permeable surface	44
Chapter 3.PECULIARITIES OF THE SEPARATED TURBULENT FLOW DEVELOPMENT BEHIND THE STEP AND THE RIB AT A CHANGING LEVEL OF OUTER TURBULENCE.....	49
3.1. Experimental techniques and test stands	49
3.1.1. Aerodynamic test stands and models for studying the flow be- hind a single rib and a step	49
3.1.2. A model of streamlining of a rectangular cavity with inclined side walls.....	55
3.1.3. Description of experimental facilities for measuring an in- clined rib and a system of ribs.....	57
3.1.4. Description of the main measuring equipment and methods to process the results.....	60
3.1.5. Methods of tracer visualization	61



3.2. Heat transfer in the separated flow behind the back-facing step under natural and increased turbulence of the main flow	62
3.2.1. Dynamics of the separated flow behind the steps of different height.....	65
3.2.2. Heat transfer in the separated flow behind the back-facing step	70
3.3. Flow separation behind the step with inclined walls	75
3.4. An effect of free-stream turbulence on dynamic characteristics and heat transfer enhancement behind a single rib.....	80
3.5. An effect of closely spaced high ribs on heat transfer.....	92
Chapter 4. FLOW AND HEAT TRANSFER BEHIND THE RIBS PLACED AT AN ANGLE TO THE FLOW	99
4.1. Development of the separated flow behind the rib at a varying angle of incidence	99
4.2. Heat transfer in the system of ribs placed at an angle to the flow	113
4.3. Streamlining of the system ribs by turbulized flows	122
Chapter 5. FLOW AND HEAT TRANSFER IN CAVITIES	127
5.1. A 3-D flow structure in cavities	127
5.2. Peculiarities of heat transfer in cavities with inclined walls.....	135
5.3. An effect of flow turbulence on heat transfer in cavities.....	143
5.4. Passive control of heat transfer inside cavities.....	147
Chapter 6. AN EFFECT OF SEPARATED ZONES ON THE VORTEX FORMATION AND TURBULENT HEAT TRANSFER IN A TUBE	155
6.1. An effect of the dynamic prehistory on heat transfer in the separated flow.....	155
6.2. An effect of the thermal prehistory on heat transfer under flow separation.....	162
6.3. A separated flow structure and heat transfer depending on the rate of pipe expansion.....	168
6.4. Heat transfer enhancement when streamlining obstacles of various shapes	177
6.5. Thermohydraulic efficiency of a detached orifice of the pipeline.....	193
6.6. A separated flow in an axisymmetric diffuser after a sudden pipe expansion	205
References.....	214