

М. Ф. ШИРОКОВ

Ф ИЗИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ГАЗОДИНАМИКИ

М. Ф. ШИРОКОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ГАЗОДИНАМИКИ

И ПРИМЕНЕНИЯ ЕЕ К ПРОЦЕССАМ
ТЕПЛООБМЕНА И ТРЕНИЯ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1958

АННОТАЦИЯ

Данная монография содержит систематическое изложение физических основ газодинамики с учетом новейших работ советских и иностранных ученых. Большое место в книге уделено вопросам теплообмена и трения в газодинамических потоках, имеющим важнейшее прикладное значение.

Книга рассчитана на научных работников и инженеров, работающих в области газодинамики и теплопередачи, а также на студентов старших курсов физико-математических факультетов университетов.

Широков Михаил Федорович.

Физические основы газодинамики и применения ее к процессам теплообмена и трения.

Редактор *В. Л. Лельчук.*

Технический редактор *А. П. Колесникова.*

Корректор *Л. О. Сечейко.*

Сдано в набор 5/IX 1957 г. Подписано к печати 15/II 1958 г. Бумага 84 × 108^{1/2}.
Физ. печ. л. 17,42. Условн. печ. л. 10,62. Уч.-изд. л. 16,42. Тираж 6000 экз. Т-02223.
Цена книги 10 руб. 20 коп. Заказ № 2430.

Государственное издательство физико-математической литературы
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Типография № 2 им. Евг. Соколовой УПП Ленсовнархоза.
Ленинград, Измайловский пр., 29

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
-----------------------	---

ГЛАВА I

Элементы тензорного исчисления

1. Пространства квадратичной формы, преобразования координат, определение тензора	13
2. Алгебра тензоров	18
3. Основная теорема о тензорах	22
4. Метрические тензоры, поднятие и опускание значков у тензоров	23
5. Геодезическая линия, символы Кристоффеля 1-го и 2-го рода	25
6. Тензорный анализ (краткие сведения)	27

ГЛАВА II

Уравнения газодинамики и пределы их применимости

7. Общие уравнения механики сплошной среды, законы сохранения	36
8. Феноменологический тензор натяжений, уравнения газодинамики	42
9. Первое начало термодинамики как одно из основных уравнений газодинамики	44
10. Полная система уравнений газодинамики в декартовых и криволинейных координатах, граничные условия	48
11. Функция распределения и уравнения переноса Максвелла	55
12. Уравнения газодинамики общего вида в молекулярно-кинетической теории	58
13. Строгая молекулярно-кинетическая теория вязкости и теплопроводности	59
14. Теории вязкости и теплопроводности, опирающиеся на понятие среднего пробега	62
15. Пределы применимости уравнений газодинамики	67

ГЛАВА III

Теория турбулентности в газодинамических потоках

16. Турбулентные течения	75
17. Происхождение турбулентности	77

18. Установившаяся турбулентность	80
19. Пространственные и временные усреднения	81
20. Усредненные уравнения газодинамики	84
21. Проблема газодинамических турбулентных течений, упрощающие предположения	89
22. Турбулентная вязкость и теплопроводность	92
23. Гидродинамическое сопротивление в изотермических потоках несжимаемых жидкостей в трубах	95

ГЛАВА IV

Связь между сопротивлением и теплообменом
в газодинамических потоках

24. Проблема конвективного теплообмена	99
25. Аналогия трения и теплообмена в газодинамических потоках	100
26. Теплообмен в трубах и на стенках хорошо обтекаемых тел	104
27. Сравнение теории с опытом	107
28. Подобие полей температур торможения и скоростных	111
29. Гидродинамическая теория турбулентной диффузии, турбулентное горение	115

ГЛАВА V

Подобие газодинамических течений

30. Подобие физических процессов, критерии подобия	122
31. Подобие газодинамических процессов	127

ГЛАВА VI

Сопротивление и теплообмен при газодинамических
течениях в каналах (внутренняя задача)

32. Уравнения газодинамики для одномерных течений в каналах	132
33. Одномерное течение без трения и теплообмена	136
34. Одномерное течение в цилиндрических трубах	141
35. Газодинамическое течение в цилиндрических трубах без теплообмена, коэффициент сопротивления	148
36. Сопротивление при газодинамических течениях без теплообмена в цилиндрических трубах при больших числах Рейнольдса	157
37. Установившееся течение в цилиндрических трубах с теплообменом, коэффициент теплоотдачи	165
38. Влияние на теплообмен входного участка с неустановившимся режимом течения	170

- | | |
|---|-----|
| 39. Пределы применимости газодинамической теории трения и теплообмена в трубах, степень точности экспериментальных исследований | 172 |
| 40. Теплообмен при газодинамических течениях в трубах с изменением агрегатного состояния | 180 |

ГЛАВА VII

Ударные волны

- | | |
|--|-----|
| 41. Малые возмущения и скорость их распространения (звуковые волны) | 192 |
| 42. Особенности сверхзвуковых течений, волны сжатия и разрежения | 194 |
| 43. Об уравнениях газодинамики для внешней задачи | 198 |
| 44. Сверхзвуковое обтекание выпуклого угла | 199 |
| 45. Ударные волны (скачки уплотнения) | 206 |
| 46. Уравнения для расчета плоской ударной волны | 208 |
| 47. Прямая ударная волна (прямой скачок уплотнения) | 211 |
| 48. Повышение давления при обтекании тупого препятствия, измерение скорости, статического давления и температуры | 213 |
| 49. Ударная поляра, максимальный угол отклонения потока | 217 |
| 50. Обтекание клина и конуса | 220 |

ГЛАВА VIII

Газодинамический пограничный слой, трение и теплообмен при обтекании тел (внешняя задача)

- | | |
|--|-----|
| 51. Дифференциальные уравнения пограничного слоя и граничные условия | 230 |
| 52. Интегральные законы сохранения для пограничного слоя | 235 |
| 53. Преобразование уравнений пограничного слоя к более удобным переменным | 237 |
| 54. Пограничный слой вдоль плоской пластины для газа с числами $Pr = 1$ и $n = 1$ (линейная зависимость вязкости от температуры) | 240 |
| 55. Применение к пограничному слою интегральных законов сохранения | 247 |
| 56. Пограничный слой вдоль поверхности клина | 249 |
| 57. Пограничный слой вблизи конуса вращения | 251 |
| 58. Влияние на сопротивление и теплообмен числа Pr и закона зависимости вязкости от температуры | 259 |
| 59. Пограничный слой вдоль криволинейного профиля и его срыв | 266 |
| 60. Турбулентный пограничный слой, «ламинарный» или «вязкий» подслое | 273 |
| 61. Турбулентный пограничный слой при $Pr = 1$ в вязком подслое | 281 |

62. Влияние на турбулентное трение и теплообмен вязкого подслоя при $Pr \neq 1$, коэффициент восстановления . . .	290
63. Экспериментальные данные по течению в пограничном слое, сравнение теории с опытом	296

ГЛАВА IX

Газодинамика разреженных газов

64. Особенности течений разреженных газов	312
65. Граничные условия для течений со скольжением при больших числах M	315
66. Пограничный слой в разреженных газах, законы трения и теплообмена	325
67. Молекулярные течения при больших числах M	331
Литература	338