

А.М. ХАРИТОНОВ

ТЕХНИКА И МЕТОДЫ АЭРОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

НОВОСИБИРСК
2010

УДК 533.6.01(075.8)

X 207

Рецензенты:

академик РАН, проф. *Э.П. Волчков*,

канд. техн. наук, лауреат Государственной премии *С.Г. Деряшев*

Харитонов А.М.

X 207 Техника и методы аэрофизического эксперимента : учебник /
А.М. Харитонов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 643 с. – (Серия
«Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1683-9

Изложены основы моделирования условий полета летательных аппаратов в аэрофизическом эксперименте и подробно рассматривается техника экспериментирования при дозвуковых, трансзвуковых, сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях. Обсуждаются основные принципы, схемные и конструктивные особенности современных аэродинамических труб и газодинамических установок. Детально описаны самые современные средства и методы измерений параметров потока и визуализации течений.

В таком объеме эти проблемы рассмотрены лишь в монографиях, которые вышли из печати в 60-х годах прошлого столетия. С одной стороны, они уже стали библиографической редкостью, а с другой, за прошедшие почти 40 лет появились существенно отличающиеся, новые экспериментальные установки. Техника и методы аэрофизического эксперимента обогатились новыми принципами и методологией исследований. Значительно ускорился процесс совершенствования измерительных средств и оборудования для аэродинамических лабораторий. В практику экспериментальной аэродинамики все больше внедряются новые достижения физики и электроники. Эти соображения послужили основанием для переиздания учебника, который был опубликован в двух частях: в 2005 г. – часть 1, а в 2007 г. – часть 2. Настоящее, второе, издание наряду с исправлениями и добавлениями включает обе части.

Книга рассчитана на студентов старших курсов вузов, специализирующихся в области авиа- и ракетостроения, и будет полезной аспирантам, инженерам, а также научным работникам авиационно-космической и других отраслей промышленности.

УДК 533.6.01(075.8)

ISBN 978-5-7782-1683-9

© Харитонов А.М., 2011

© Новосибирский государственный
технический университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	11
Введение.....	14
Основные обозначения	23
Часть 1. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ	27
Глава 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ В АЭРОФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ	29
1.1. Условия динамического подобия потоков.....	29
1.1.1. Условия подобия сил трения при ламинарном течении и сил инер- ции.....	31
1.1.2. Условия подобия сил трения и сил инерции при турбулентном течении.....	33
1.1.3. Условия подобия сил тяжести и сил инерции	34
1.1.4. Условия подобия сил давления в несжимаемой жидкости и сил инерции	35
1.1.5. Условия подобия сил давления в сжимаемой жидкости и сил инерции	36
1.1.6. Условия подобия сил инерции при неустановившемся течении.....	38
1.1.7. Условия подобия аэродинамических сил и сил упругости	39
1.2. Условия теплового подобия потоков	41
1.3. Метод размерностей. π -теорема.....	44
1.4. Полное и частичное подобие.....	47
1.5. Трубы переменной плотности.....	49
1.6. Моделирование при гиперзвуковых скоростях	51
Глава 2. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ ДОЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ	55
2.1. Основные элементы аэродинамических труб малых скоростей.....	56
2.2. Форкамера.....	58
2.3. Сопло	62
2.4. Рабочая часть	68
2.5. Диффузор	70
2.6. Вентиляторная установка и поворотные колена	73
2.7. Качество и экономичность труб	75
2.8. Расчет аэродинамических труб малых скоростей	76

Глава 3. ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ.....	81
3.1. Трансзвуковые аэродинамические трубы	82
3.1.1. Сверхзвуковое течение в рабочей части с камерой Эйфеля	86
3.1.2. Течение в рабочей части с замкнутой камерой Эйфеля	87
3.2. Выравнивающее действие перфорированной границы в сверхзвуковых течениях	91
3.3. Расчет течений в рабочей части с незамкнутой камерой Эйфеля	95
3.4. Течение в околосзвуковой рабочей части при наличии в ней модели.....	98
3.5. Трансзвуковые трубы криогенного типа.....	101
Глава 4. ИДЕАЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ТРУБАХ	107
4.1. Сопла сверхзвуковых труб	107
4.2. Рабочие части сверхзвуковых аэродинамических труб.....	113
4.3. Диффузоры сверхзвуковых аэродинамических труб.....	119
4.4. Газовый эжектор.....	127
4.4.1. Основные уравнения эжектора	131
4.4.2. Газовый эжектор с перфорированным соплом.....	135
4.5. Осушка и подогрев воздуха.....	136
4.6. Конденсация воздуха. Необходимость подогрева осушенного воздуха.....	139
4.7. Сверхзвуковая труба ИТПМ Т-313	142
Глава 5. ГИПЕРЗВУКОВЫЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ.....	147
5.1. Трубы Людвига.....	151
5.2. Импульсные трубы с разрядной камерой	153
5.3. Ударные трубы	163
5.4. Ударные трубы с легким и тяжелым поршнем	175
5.5. Аэродинамические трубы адиабатического сжатия	178
5.6. Баллистические трассы	188
5.7. Гиперсверхзвуковые аэродинамические трубы с МГД-ускорением потока воздуха	193
Часть 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АЭРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	197
Глава 6. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕ- РИСТИК.....	199
6.1. Механические весы	202
6.2. Весовые элементы аэродинамических весов	210
6.3. Аэродинамические весы механического типа АВ-313М	214
6.4. Аэродинамические весы тензометрического типа.....	220
6.4.1. Тензодатчики сопротивления.....	221
6.4.2. Принципы устройства тензометрических весов	226
6.4.3. Градуировка внутримодельных аэродинамических весов	236

6.5. Комбинированные измерения аэродинамических характеристик.....	240
6.6. Электромагнитные весы	248
Глава 7. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЙ.....	257
7.1. Измерения статических давлений.....	257
7.1.1. Измерения распределения статических давлений на моделях	258
7.1.2. Приемники статических давлений	262
7.2. Измерения полного давления.....	266
7.3. Пневмометрические методы измерения скоростей	273
7.4. Источники погрешностей измерения давлений	282
7.5. Регистрирующие приборы для измерения давлений	286
7.5.1. Жидкостные манометры.....	287
7.5.2. Механические манометры.....	292
7.5.3. Электрические датчики давления.....	295
7.6. Многоточечные измерения давлений в аэродинамическом эксперименте	303
Глава 8. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ.....	311
8.1. Методы и средства измерения температуры	312
8.1.1. Основные понятия и определения	312
8.1.2. Контактные методы измерения температур	315
8.1.3. Бесконтактные методы измерения температуры	321
8.1.4. Оптическая пирометрия.....	323
8.1.5. Термоиндикаторные покрытия	326
8.2. Методы измерения тепловых потоков	331
8.2.1. Калориметрический метод измерения тепловых потоков.....	332
8.2.2. Градиентные датчики теплового потока.....	338
8.2.3. Методика определения тепловых потоков с использованием термоиндикаторных покрытий	341
8.2.4. Тепловизионный метод измерения тепловых потоков.....	345
8.2.5. Оптический метод измерения тепловых потоков	350
Глава 9. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНИХ И МГНОВЕННЫХ СКОРОСТЕЙ.....	355
9.1. Методы, основанные на измерении скорости введенных в поток частиц.....	356
9.1.1. Измерение скорости посредством трассирования потока ионами	357
9.1.2. Измерение скорости с помощью светящихся частиц	358
9.1.3. Лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС)	359
9.2. Измерение средних и мгновенных скоростей с помощью термоанемо- метра.....	365
9.2.1. Градуировка термоанемометрических зондов	373
9.2.2. Тепловые потери нити при сверхзвуковых скоростях.....	377
9.2.3. Метод измерения напряжений Рейнольдса	385

9.3. Другие методы измерения скоростей.....	389
9.3.1. Акустический анемометр	389
9.3.2. Методы, основанные на измерении подъемной силы и сопротивления.....	394
9.3.3. Метод рассеянного света для измерения пульсационных характеристик ламинарных и турбулентных течений жидкостей	396
9.3.4. Электроискровой метод измерения скорости.....	399
Глава 10. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ	403
10.1 Прямые методы измерения поверхностного трения.....	405
10.1.1. Метод плавающего элемента	405
10.1.2. Метод лазерной интерферометрии масляной пленки.....	411
10.2. Косвенные методы измерения поверхностного трения.....	416
10.2.1. Методы, основанные на универсальности профилей скорости в турбулентном пограничном слое.....	416
10.2.1.1. Поверхностные трубки полного напора.....	421
10.2.1.2. Метод Престона	424
10.2.2. Методы, основанные на обтекании препятствий в пограничном слое.....	427
10.2.3. Метод аналогий между поверхностным трением и теплопередачей	431
10.2.4. Методы поверхностных линий тока.....	436
10.3. Электродиффузионный метод измерения поверхностного трения	441
Глава 11. МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ	445
11.1. Методы визуализации течений капельных жидкостей и газовых потоков.....	447
11.1.1. Красящие вещества (введение красителей и/или электрохимия).....	447
11.1.2. Метод водородных пузырьков	450
11.1.3. Введение в поток твердых частиц	452
11.1.4. Введение в поток дыма.....	455
11.2. Методы визуализации течений в пристенных областях моделей.....	458
11.2.1. Метод шелковинок.....	458
11.2.2. Маслосажевая визуализация поверхностных линий тока	460
11.2.3. Метод стробоскопической визуализации потоков.....	463
11.2.4. Метод визуализации полей скорости по изображениям движущихся частиц	466
11.2.5. Метод визуализации поверхностных давлений	470
11.3. Оптические методы визуализации течений	472
11.3.1. Теневые методы исследований газовых потоков	473
11.3.2. Интерференционные методы	481
11.3.3. Голографические методы	485

11.3.4. Метод «лазерного ножа»	487
11.3.5. Электронно-пучковая диагностика.....	493
Глава 12. СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	497
12.1. Основные понятия автоматизированного эксперимента.....	497
12.1.1. Цели и задачи автоматизации экспериментальных исследований.....	498
12.1.2. Типовая схема системы автоматизации экспериментальных ис- следований.....	499
12.2. Измерительная система	501
12.2.1. Сигналы в измерительной системе.....	501
12.2.2. Электронные компоненты измерительной системы.....	502
12.3. Подключение экспериментального оборудования к ЭВМ.....	505
12.3.1. Непосредственное подключение оборудования к компьютеру	505
12.3.2. Магистрально-модульные системы сбора данных. Система КАМАК	506
12.4. Автоматизированные комплексы сбора экспериментальных данных	510
12.4.1. Автоматизация сбора данных медленно протекающих процессов	510
12.4.2. Системы сбора данных быстро протекающих процессов	511
12.4.3. Автоматизация весовых испытаний	512
12.5. Системы сбора и обработки экспериментальных данных.....	514
12.5.1. Типовой измерительный комплекс в стандарте КАМАК	514
12.5.2. Встраиваемые системы сбора экспериментальных данных.....	515
12.5.3. Одно- и многоуровневые системы автоматизации	517
12.5.4. Системы ввода и обработки панорамных изображений.....	519
12.6. Информационные технологии в системах автоматизации эксперимен- та	520
12.6.1. Хранение экспериментальных данных в ЭВМ.....	520
12.6.2. Сетевые технологии в автоматизированном эксперименте	524
12.7. Программное обеспечение систем автоматизации	527
12.7.1. Использование штатного программного обеспечения	528
12.7.2. Разработка специализированного программного обеспечения	529
12.7.3. Система графического программирования LabVIEW	531
12.7.4. Использование системы MATLAB для обработки данных.....	533
Глава 13. ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА	537
13.1. Погрешности средств измерений и результатов измерений	538
13.1.1. Классификация погрешностей средств и результатов измерений	538
13.1.2. Методы нормирования погрешностей средств измерений	543
13.1.3. Классы точности.....	544
13.1.4. Оценка погрешности результатов измерения по паспортным дан- ным средств измерений	546

13.1.5. Правила округления значения результата измерения и его погрешности	547
13.1.6. Оценка погрешности косвенных измерений	548
13.1.7. Погрешности определения числа Маха в аэродинамическом эксперименте	553
13.2. Методы вероятностного описания результатов измерений и их погрешностей.....	557
13.2.1. Описание случайных величин с помощью функции распределения	559
13.2.2. Математическое ожидание и дисперсия	564
13.2.3. Нормальный закон распределения случайных величин.....	569
13.2.4. Точечные оценки	573
13.2.5. Оценки параметров с помощью интервалов.....	577
13.3. Математическая обработка исправленных результатов измерений.....	588
13.3.1. Обнаружение грубых погрешностей	588
13.3.2. Способы обнаружения систематических погрешностей.....	590
13.3.3. Проверка нормальности распределения результатов измерений	594
13.3.4. Обработка результатов прямых измерений	597
13.3.5. Обработка результатов косвенных измерений	602
Приложение	607
П1. Таблица для расчета изэнтропических течений	607
П2. Таблица для расчета соотношений на прямом скачке	613
П3. Углы распространения слабых возмущений α_0 и функции Прандтля–Майера $f(M)$	618
П4.1–П4.3. Таблицы к главе 13	621
Библиографический список.....	625