

УДК 621.4:536.27
ББК 31.36
И20

Издание доступно в электронном виде по адресу
ebooks.bmstu.ru/catalog/127/book1992.html

Рецензенты:

профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение»
Казанского национального технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ),
д-р техн. наук, профессор *А.В. Щукин*;
профессор кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» Московского
автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ),
д-р техн. наук, профессор *И.Е. Иванов*

Иванов, В. Л.

И20 Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных
и комбинированных установок : учебник для вузов / В. Л. Иванов,
Э. А. Манушин ; под общ. ред. чл.-корр. РАН А. Ю. Вараксина. —
3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Бау-
мана, 2019. — 534, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4813-5

Изложены основы расчета и проектирования теплообменных аппаратов
и систем охлаждения газовых турбин как элементов газотурбинного комплекса,
все агрегаты которого влияют друг на друга, а их параметры взаимосвязаны.

Содержание учебника соответствует курсам лекций, читаемых авторами
в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов высших учебных заведений энергомашиностроительных
специальностей. Может быть полезен аспирантам, инженерам и научным ра-
ботникам.

УДК 621.4:536.27
ББК 31.36

Фото на обложку предоставлено ООО «Сименс»

ISBN 978-5-7038-4813-5

© Иванов В.Л., Манушин Э.А., 2019
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Оглавление

Предисловие	5
Условные обозначения.....	8
Принятые сокращения	10
Введение	11
Раздел I. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ ГАЗОТУРБИННЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ УСТАНОВОК.....	21
Глава 1. Теплообменные аппараты в составе газотурбинных и комбинированных установок.....	23
1.1. Назначение, использование и классификация теплообменных аппаратов	23
1.2. Поверхности теплообмена теплообменных аппаратов	28
1.2.1. Конфигурация поверхности теплообмена	28
1.2.2. Используемые характеристики поверхностей теплообмена	34
1.3. Влияние параметров теплообменного аппарата на теплотехнические показатели газотурбинной установки	37
1.4. Техничко-экономические требования к теплообменным аппаратам	47
Глава 2. Теплопередача и гидравлическое сопротивление теплообменных аппаратов поверхностного типа	49
2.1. Конвективный теплообмен в матрице теплообменного аппарата	49
2.2. Теплопередача через оребренную поверхность теплообмена	53
2.2.1. Коэффициент эффективности ребра	53
2.2.2. Коэффициент эффективности оребренной поверхности, коэффициент теплопередачи через оребренную поверхность	56
2.2.3. Дополнительная информация об оребренных поверхностях	57
2.3. Гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата	61
2.4. Теплогидравлические характеристики типовых поверхностей теплообмена	69
2.5. Влияние свойств теплоносителя на основные показатели теплообменного аппарата	77
2.6. Влияние загрязнения на теплогидравлические характеристики поверхности теплообмена.....	80
2.7. Интенсификация процесса теплообмена в матрице теплообменного аппарата	84

Глава 3. Теплогидравлический расчет теплообменных аппаратов	91
3.1. Теплообменные аппараты рекуперативного типа	91
3.1.1. Основные схемы и особенности расчета	91
3.1.2. Среднеинтегральный температурный напор	93
3.1.3. Эффективность теплообменного аппарата. Число единиц переноса теплоты	101
3.1.4. Расчет теплообменного аппарата при заданных значениях потери давления газообразных теплоносителей	103
3.1.5. Расчет теплообменного аппарата при заданной площади поверхности теплообмена	110
3.1.6. Особенности расчета теплообменного аппарата с заданными габаритными размерами	112
3.1.7. Теплообменный аппарат с контуром промежуточного теплоносителя	113
3.1.8. Теплообменные устройства на основе термосифонов и тепловой трубы	123
3.2. Теплообменные аппараты регенеративного типа	145
3.2.1. Схема и основные характеристики	145
3.2.2. Регенеративный теплообменный аппарат с неподвижной матрицей	148
3.2.3. Регенератор с вращающейся матрицей	156
3.3. Обобщенные характеристики теплообменников ГТУ	164
Глава 4. Проектирование теплообменных аппаратов	176
4.1. Согласование параметров теплообменного аппарата с параметрами теплосиловой установки	176
4.1.1. Выбор оптимальной степени регенерации	176
4.1.2. Зависимость площади поверхности регенератора от степени регенерации и заданного значения потерь давления теплоносителей	183
4.1.3. Оптимальное распределение суммарной площади поверхности теплообмена между теплообменными аппаратами ГТУ замкнутого цикла	186
4.2. Выбор поверхности теплообменного аппарата	190
4.3. Компенсация тепловых расширений	194
4.4. Прочностные характеристики теплообменных аппаратов	197
4.5. Примеры конструкций теплообменных аппаратов	200
4.5.1. Воздухоохладители ГТУ открытого цикла	200
4.5.2. Воздухоподогреватели (регенераторы) ГТУ открытого цикла	206
4.5.3. Маслоохладители	215
4.6. Теплообменники ГТУ замкнутого цикла	217
4.7. Радиационные теплообменные аппараты космических летательных аппаратов.....	224
Заключение к разделу I	230

Раздел II. СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ УСТАНОВОК.....231

Глава 5. Теплообмен между газом и элементами проточной части лопаточных машин	233
5.1. Системы охлаждения газовых турбин. Способы и схемы охлаждения турбинных лопаток	233
5.1.1. Особенности конструкций охлаждаемых турбин	233
5.1.2. Конструкции охлаждаемых лопаток	248
5.1.3. Этапы и проблемы развития систем охлаждения турбин.....	266
5.2. Теплоотдача на наружных поверхностях лопаток газовых турбин ...	270
5.2.1. Особенности течения и теплообмена на наружных поверхностях лопаток	270
5.2.2. Расчетные методы определения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях лопаток турбин	272
5.2.3. Обобщенные экспериментальные данные о теплоотдаче к турбинным профилям	283
5.2.4. Теплообмен на поверхностях лопаток турбин при пленочном и пористом охлаждении	295
5.3. Теплоотдача к элементам корпуса турбомшины	310
5.3.1. Схемы охлаждения корпуса	310
5.3.2. Теплоотдача на торцевых поверхностях межлопаточных каналов осевых турбин	313
5.3.3. Теплоотдача к корпусу турбины в зоне осевого зазора	315
5.3.4. Теплоотдача к корпусу турбины в радиальном зазоре	316
5.3.5. Теплоотдача к корпусу турбины за рабочим колесом	317
5.3.6. Теплоотдача на торцевых поверхностях рабочих лопаток осевых турбин	319
5.3.7. Теплоотдача к стенке корпуса, противостоящей боковой поверхности ротора	321
5.4. Теплоотдача к элементам ротора турбомшины	322
5.4.1. Схемы охлаждения роторов	322
5.4.2. Теплоотдача к торцевым поверхностям ротора	324
5.4.3. Теплоотдача к цилиндрическим гладким участкам роторов и корпусов	336
5.4.4. Теплоотдача в замкнутых и слабовентилируемых полостях роторов	338
5.4.5. Теплоотдача в проточной части рабочих колес радиально-осевых (центростремительных) газовых турбин	343
5.4.6. Теплообмен в монтажных зазорах замковых соединений	349
5.5. Теплообмен в лабиринтных уплотнениях	351

Глава 6. Течение и теплообмен в каналах систем охлаждения сопловых и рабочих лопаток газовых турбин	357
6.1. Способы интенсификации теплообмена в каналах	357
6.2. Теплоотдача в охлаждающих каналах лопаток газовых турбин с воздушным охлаждением	366
6.2.1. Общие сведения	366
6.2.2. Теплоотдача в охлаждающих каналах сопловых лопаток	367
6.2.3. Теплоотдача в охлаждающих каналах рабочих лопаток	372
6.2.4. Теплоотдача внутри проницаемых материалов оболочек лопаток	375
6.2.5. Теплообмен при течении во внутренних каналах лопаток с проницаемым охлаждением	383
6.3. Теплообмен в каналах жидкостных и двухконтурных систем охлаждения	384
6.3.1. Жидкостное охлаждение	384
6.3.2. Двухконтурное охлаждение	389
Глава 7. Гидравлический расчет систем охлаждения	397
7.1. Принципы построения гидравлических сетей и основы расчета гидравлических сопротивлений в типовых элементах систем охлаждения лопаток	397
7.2. Гидравлические характеристики охлаждающих трактов составных проницаемых оболочек	409
7.3. Гидравлические сопротивления при течении охлаждающего воздуха вблизи диска	412
Глава 8. Расчет температурного состояния охлаждаемых деталей газовых турбин в стационарных и нестационарных условиях	417
8.1. Задачи расчета температурных полей в охлаждаемых деталях газовых турбин	417
8.2. Расчет температурного состояния сопловых лопаток с продольным и поперечным течениями охлаждающего воздуха	420
8.3. Расчет распределения температуры по длине рабочей лопатки ...	433
8.4. Расчет распределения температуры в стенках турбинных лопаток из пористых материалов и в многослойных проницаемых стенках	435
8.5. Расчет распределения температуры по радиусу охлаждаемого диска турбины	444
8.6. Расчет температурного поля в сечениях охлаждаемых лопаток и дисков турбин в нестационарных условиях	447
8.7. Расчет температурного состояния лопаток турбин методом конечных элементов в нестационарных условиях	451

Глава 9. Эффективность систем охлаждения, основные положения их конструирования	457
9.1. Эффективность систем охлаждения турбин	457
9.2. Влияние глубины и способа охлаждения на эффективность ГТУ	458
9.3. Основные положения конструирования охлаждаемых лопаток газовых турбин	461
Глава 10. Экспериментальные методы исследования в процессе конструирования систем охлаждения газовых турбин	470
10.1. Цели экспериментальных исследований	470
10.2. Исследования для уточнения гидравлической модели лопатки	471
10.3. Исследования в целях уточнения тепловой модели лопатки	475
10.4. Экспериментальные исследования теплообмена на поверхностях лопаток	482
10.5. Расчет стационарных температурных полей в охлаждаемых деталях турбин методом электротепловой аналогии	488
Глава 11. Расчет температурного состояния основных деталей камер сгорания газотурбинных двигателей	498
11.1. Основные характеристики конструкции камеры сгорания	498
11.2. Процессы теплопередачи в камере сгорания	502
11.3. Расчет температуры неохлаждаемой жаровой трубы	508
11.4. Пленочное охлаждение жаровой трубы камеры сгорания	511
11.5. Другие методы охлаждения стенок жаровой трубы	519
11.6. Расчет охлаждения пористой стенки	522
Заключение к разделу II	525
Литература	527