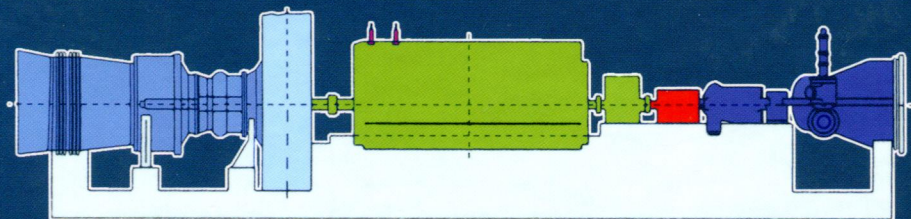


**А.Д.Трухний**



---

# **ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

---

**учебное пособие для вузов**

**А.Д.Трухний**

---

# **Парогазовые установки электростанций**

---

**учебное пособие для вузов**

Допущено Учебно-методическим объединением  
вузов России по образованию  
в области энергетики и электротехники  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлениям подготовки  
"Энергетическое машиностроение"  
и "Теплоэнергетика и теплотехника"

Москва  
Издательский дом МЭИ  
2013

УДК 621.18:621.311.22.002.5(075.8)  
ББК 31.374я 73  
Т 81

*Издано при содействии Фонда поддержки научной,  
научно-технической и инновационной деятельности  
«Энергия без границ», созданного по инициативе  
ОАО «Интер РАО»*

**Рецензенты:**

Г.Г. Ольховский, чл.-корр. РАН (ОАО «ВТИ»),  
А.В. Клименко, чл.-корр. РАН (НИУ «МЭИ»)

**Трухний А.Д.**

Т 81 Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013. — 648 с.: ил.

ISBN 978-5-383-00721-1

Рассмотрены термодинамические основы комбинированных и парогазовых циклов; основные характеристики утилизационных ПГУ, ПГУ с параллельной схемой, с дожиганием, с газопаровой турбиной, сбросные ПГУ, ПГУ с высоконапорным парогенератором, с нагревом питательной воды выхлопными газами ГТУ. Изложены особенности технологического процесса парогазовой ТЭС; принципиальные тепловые схемы утилизационных одно-, двух- и трехконтурных ПГУ, их расчет; конструкции облопачивания газовых турбин и компрессоров, роторов, камер сгорания, корпусов и опор ротора, уплотнений ГТД утилизационных ПГУ. Приведены номенклатура и технические характеристики современных мощных энергетических отечественных ГТУ, ГТД фирм Siemens, Alstom Power, GE Energy, Mitsubishi; особенности конструкций котлов-утилизаторов и паровых турбин для утилизационных ПГУ, компоновок одно- и многовальных ПГУ в машинном зале ТЭС. Описаны режимы работы утилизационных ПГУ и их энергетические характеристики; техническое обслуживание ГТУ в процессе жизненного цикла; технология пусков моноблоков и дубль-блоков; аварийные режимы ПГУ.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели», может использоваться студентами, обучающимися по направлениям подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Энергетическое машиностроение».

УДК 621.18:621.311.22.002.5(075.8)

ББК 31.374я 73

*Все права защищены. Книга не может быть воспроизведена полностью или частично в бумажном или электронном формате без письменного разрешения правообладателя.*

ISBN 978-5-383-00721-1

© Трухний А.Д., 2013  
© ЗАО «Издательский дом МЭИ», 2013

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	7
<b>Основные сокращения</b> .....	13
<b>Часть первая. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК</b> .....	15
<b>Глава первая. ТЕПЛОСИЛОВЫЕ ЦИКЛЫ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК</b> .....	17
1.1. Понятие о комбинированном, бинарном и парогазовом циклах.....	17
1.2. Парогазовые циклы.....	22
1.3. Особенности газотурбинного цикла ПГУ.....	25
Контрольные вопросы.....	27
Литература для самостоятельного изучения.....	27
<b>Глава вторая. ТИПЫ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b> .....	28
2.1. Классификация ПГУ.....	28
2.2. Утилизационные ПГУ.....	32
2.3. ПГУ с параллельной схемой.....	39
2.4. ПГУ с дожиганием.....	46
2.5. ПГУ с газопаровой турбиной.....	53
2.6. Сбросные ПГУ.....	62
2.7. ПГУ с высоконапорным парогенератором.....	71
2.8. ПГУ с нагревом питательной воды выхлопными газами ГТУ.....	74
Контрольные вопросы.....	81
Литература для самостоятельного изучения.....	81
<b>Глава третья. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ПАРОГАЗОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ</b> .....	82
3.1. Классификация утилизационных ПГУ.....	82
3.2. Общая технологическая схема получения электроэнергии в парогазовой электростанции.....	89
3.2.1. Особенности технологического процесса выработки электроэнергии в паросиловой установке ПГУ.....	89
3.2.2. Особенности технологического процесса выработки электроэнергии в газотурбинной установке ПГУ.....	90
3.3. Особенности технологического процесса получения тепловой энергии в теплофикационной ПГУ.....	93
3.4. Снабжение парогазовых установок топливом.....	94
3.4.1. Виды топлива, сжигаемого в ПГУ.....	94
3.4.2. Подготовка к сжиганию газообразного топлива.....	94
3.4.3. Подготовка жидкого топлива.....	97
3.5. Подготовка циклового воздуха.....	100
3.5.1. Защита от погодных воздействий и фильтрация воздуха.....	101
3.5.2. Комплексные воздухоочистительные установки.....	105
Контрольные вопросы.....	107
Литература для самостоятельного изучения.....	108
<b>Глава четвертая. ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ И ИХ РАСЧЕТ</b> .....	109
4.1. Цель и задачи теплового расчета ПГУ.....	109
4.2. Исходные данные и последовательность расчета тепловой схемы.....	111
4.3. Расчет мощности паровой турбины ПГУ.....	112
4.4. Определение экономических показателей.....	115
4.5. Расчет тепловой схемы одноконтурной ПГУ.....	116
4.6. Расчет тепловой схемы двухконтурной ПГУ.....	127
4.6.1. Исходные данные.....	127
4.6.2. Выбор опорных значений расчетной схемы.....	129

4.6.3. Тепловой расчет котельной установки.....	130
4.6.4. Выбор концепции паровой турбины и расчет процесса расширения пара в ней .....	136
4.7. Расчет тепловой схемы трехконтурной ПГУ с промежуточным перегревом пара .....	152
4.7.1. Принципиальная тепловая схема.....	152
4.7.2. Исходные данные.....	154
4.7.3. Выбор опорных значений расчетной схемы и тепловой расчет котельной установки .....	156
Контрольные вопросы .....	174
Литература для самостоятельного изучения.....	174
<b>Часть вторая. ОСНОВНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК .....</b>	<b>175</b>
<b>Глава пятая. КОНСТРУКЦИИ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ .....</b>	<b>177</b>
5.1. Технические требования к ГТД утилизационных ПГУ.....	177
5.1.1. Требование высокой экономичности .....	177
5.1.2. Требования высокой температуры выхлопных газов ГТД.....	181
5.1.3. Требование высокой надежности ГТД.....	182
5.1.4. Требование высоких экологических показателей ГТД.....	183
5.2. Рабочие лопатки газовых турбин и компрессоров .....	185
5.2.1. Условия эксплуатации рабочих лопаток газовых турбин.....	185
5.2.2. Конструкции рабочих лопаток газовых турбин .....	188
5.2.3. Материалы и покрытия рабочих лопаток газовых турбин .....	194
5.2.4. Технология изготовления рабочих лопаток газовых турбин.....	198
5.2.5. Конструкция облопачивания компрессоров .....	200
5.3. Сопловые аппараты газовых турбин .....	205
5.3.1. Условия работы сопловых лопаток газовых турбин .....	205
5.3.2. Конструкции сопловых лопаток газовых турбин .....	208
5.3.3. Материалы и покрытия сопловых лопаток газовых турбин .....	211
5.3.4. Технология изготовления сопловых лопаток газовых турбин .....	212
5.4. Роторы газотурбинных двигателей.....	212
5.4.1. Особенности сборных роторов ГТД.....	212
5.4.2. Ротор с центральным стяжным болтом.....	213
5.4.3. Ротор с окружными стяжными болтами .....	216
5.4.4. Сварной ротор.....	217
5.4.5. Условия работы роторов ГТД и их материалы.....	218
5.4.6. Производство дисков ГТД .....	220
5.5. Камеры сгорания .....	220
5.5.1. Условия работы камер сгорания.....	220
5.5.2. Технические требования к камерам сгорания .....	221
5.5.3. Типы камер сгорания и их конструкции .....	222
5.6. Корпуса и опоры ротора .....	241
5.7. Подшипники и уплотнения .....	249
Контрольные вопросы .....	253
Литература для самостоятельного изучения.....	254
<b>Глава шестая. СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ГТУ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ .....</b>	<b>255</b>
6.1. Номенклатура и технические характеристики энергетических ГТУ .....	255
6.2. ГТД газотурбинной установки ГТЭ-160 ЛМЗ .....	257
6.3. ГТД газотурбинной установки ГТЭ-110 ОАО «Сатурн» .....	268
6.4. ГТД газотурбинных установок фирмы Siemens.....	293
6.4.1. Газотурбинная установка SGT5-2000E .....	294
6.4.2. Газотурбинные установки V64.3 и V94.3 .....	295
6.4.3. Газотурбинные установки SGT5-4000F и SGT-1000F .....	305
6.4.4. Газотурбинные установки SGT5-3000E .....	311
6.5. ГТД газотурбинных установок фирмы Alstom Power .....	311
6.5.1. Газотурбинная установка GT11N2 .....	311

6.5.2. Газотурбинная установка GT13E2.....	317
6.5.3. Газотурбинная установка GT26.....	325
6.6. ГТД газотурбинных установок фирмы GE Energy.....	332
6.6.1. Фирменные обозначения и общие особенности.....	332
6.6.2. Газотурбинная установка PG2171(E).....	333
6.6.3. Газотурбинная установка PG9231(ЕC).....	336
6.6.4. Газотурбинная установка PG9351(FA).....	338
6.6.5. Газотурбинная установка PG6101(FA).....	343
6.7. ГТД газотурбинных установок фирмы МНІ.....	343
6.7.1. Общие особенности.....	343
6.7.2. Газотурбинная установка M701(M701D).....	344
6.7.3. Газотурбинная установка M701F.....	346
6.7.4. Газотурбинная установка M701G.....	356
Литература для самостоятельного изучения.....	360
<b>Глава седьмая. КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПАРОГАЗОВЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ.....</b>	<b>362</b>
7.1. Назначение и роль котельной установки в ПГУ.....	362
7.2. Технические требования к котельной установке и котлам-утилизаторам ПГУ.....	364
7.3. Тепловые схемы котельных установок.....	368
7.3.1. Схема с выделенным деаэратором повышенного давления.....	368
7.3.2. Схема с интегрированным деаэратором.....	374
7.3.3. Схема с деаэрацией в конденсаторе.....	376
7.3.4. Схема с выделенным вакуумным деаэратором.....	376
7.4. Классификация котлов-утилизаторов ПГУ.....	378
7.5. Устройство котельных барабанов.....	379
7.6. Конструкции горизонтальных котлов-утилизаторов.....	383
7.6.1. Общее устройство.....	383
7.6.2. Поверхности нагрева рабочего тела.....	388
7.6.3. Котел-утилизатор П-96 ПГУ-450Т Калининградской ТЭЦ-2.....	397
7.7. Конструкции вертикальных котлов-утилизаторов.....	402
7.7.1. Общее устройство.....	402
7.7.2. Поверхности нагрева рабочего тела.....	405
7.7.3. Котел-утилизатор П-107.....	414
Контрольные вопросы.....	419
Литература для самостоятельного изучения.....	419
<b>Глава восьмая. ПАРОТУРБИНЫЕ УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ.....</b>	<b>421</b>
8.1. Особенности ПТУ утилизационных ПГУ.....	421
8.2. Паровые турбины утилизационных ПГУ.....	422
8.2.1. Особенности паровых турбин утилизационных ПГУ.....	422
8.2.2. Паровая турбина К-110-6,5 ЛМЗ для ПГУ-325.....	424
8.2.3. Паровая турбина Т-150-7,7 ЛМЗ для ПГУ-450Т.....	434
8.2.4. Паровые турбины для утилизационных ПГУ зарубежных производителей.....	447
8.3. Конденсаторы паровых турбин утилизационных ПГУ.....	465
8.3.1. Конденсаторы турбин Т-150-7,7 ЛМЗ.....	466
8.3.2. Аксиальный конденсатор турбин фирмы Siemens.....	475
8.4. Теплофикационные установки утилизационных ПГУ.....	477
Контрольные вопросы.....	481
Литература для самостоятельного изучения.....	481
<b>Глава девятая. КОМПОНОВКИ ТУРБОАГРЕГАТОВ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК.....</b>	<b>483</b>
9.1. Классификация компоновок турбоагрегатов.....	483
9.2. Одновальные ПГУ.....	488
9.2.1. Одновальные бесподвальные ПГУ.....	488
9.2.2. Одновальные ПГУ на рамном фундаменте.....	505
9.3. Двухвальные ПГУ.....	509
9.4. Трехвальные ПГУ (дубль-блоки).....	512
9.5. Многовальные ПГУ.....	513

9.6. Основы выбора оборудования и компоновок утилизационных парогазовых энергоблоков различного назначения .....	519
Контрольные вопросы .....	524
Литература для самостоятельного изучения.....	524
<b>Часть третья. ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ .....</b>	<b>525</b>
<b>Глава десятая. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ .....</b>	<b>527</b>
10.1. Режимы работы ПГУ .....	527
10.2. Понятие об энергетической характеристике ПГУ .....	534
10.3. Энергетические характеристики ГТУ .....	535
10.4. Энергетические характеристики котла-утилизатора.....	549
10.5. Энергетические характеристики паротурбинной установки.....	556
Контрольные вопросы .....	560
Литература для самостоятельного изучения.....	560
<b>Глава одиннадцатая. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ГТУ .....</b>	<b>562</b>
11.1. Цели и задачи технического обслуживания.....	562
11.2. Текущее наблюдение за работающей ГТУ.....	563
11.3. Технические осмотры в режиме ожидания и планово-предупредительные ремонты .....	567
11.4. Технические ревизии с частичным вскрытием ГТУ и планово-предупредительные ремонты .....	567
11.5. Глобальные ревизии и капитальные ремонты ГТУ .....	568
11.6. Планирование межремонтных периодов ГТУ в условиях эксплуатации .....	570
Контрольные вопросы .....	574
Литература для самостоятельного изучения.....	575
<b>Глава двенадцатая. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПГУ .....</b>	<b>576</b>
12.1. Особенности реализации пусковых и остановочных режимов работы ПГУ .....	576
12.2. Пусковые схемы утилизационных ПГУ .....	583
12.3. Технология пусков моноблоков.....	588
12.3.1. Пуск моноблочной двухконтурной ПГУ из холодного состояния .....	588
12.3.2. Остановы ПГУ .....	599
12.3.3. Особенности пусков парогазовых энергоблоков из неостывшего и горячего состояний .....	601
12.4. Особенности технологии пусков парогазовых дубль-блоков.....	605
12.5. Аварийные режимы ПГУ.....	609
12.5.1. Аварийные режимы ГТУ .....	609
12.5.2. Аварийные режимы котла-утилизатора.....	611
12.5.3. Аварийные режимы паровой турбины.....	612
Контрольные вопросы .....	613
Литература для самостоятельного изучения.....	614
<b>Глава тринадцатая ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ .....</b>	<b>615</b>
13.1. Преимущества и недостатки ГТУ традиционной конструкции .....	615
13.2. ПГУ нового поколения фирмы GE Energy .....	617
13.3. ПГУ нового поколения фирмы Siemens .....	622
13.4. ПГУ нового поколения фирмы МНІ.....	628
13.5. Перспективы совершенствования ГТУ и утилизационных ПГУ .....	631
Контрольные вопросы .....	633
Литература для самостоятельного изучения .....	633
<b>Приложение. Определение теплофизических характеристик выхлопных газов ГТУ .....</b>	<b>635</b>
<b>Словарь основных терминов.....</b>	<b>638</b>