

В. Н. Клименко, А. И. Мазур, А. И. Сигап

КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ
С ТЕПЛОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ

— — — — —
Часть 2 — — — — —



УДК 621.31(03)

ББК 31.2я2

К49

Клименко В. Н.

К49 Когенерационные системы с тепловыми двигателями: справочное пособие. – В 3-х частях / Клименко В. Н., Мазур А. И., Сигал А. И.; под ред. А. И. Мазура. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2008 – ISBN 978-966-8449-25-3

Часть 2: Газотурбинные когенерационные технологии. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2011. – 792 с.: ил. 434 + 34 (z), табл. 153 + 5 (z), список лит. – 217 назв. ISBN 978-966-8449-27-7

В книге приводятся методология и результаты расчетных и экспериментальных исследований энергетических характеристик, и прежде всего, топливной экономичности различных тепловых схем газотурбинных ТЭЦ и парогазовых электростанций преимущественно малой и средней мощности. Рассмотрены условия эффективности ГТУ-надстроек для модернизации отопительных котельных и ТЭЦ и превращении промышленных ТЭЦ в ПГУ сбросных схем. Представлены данные по техническим характеристикам и номенклатуре ГТУ ведущих мировых производителей, конструктивные и тепловые схемы котлов-утилизаторов.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями, проектированием и эксплуатацией газотурбинных ТЭЦ и ПГУ; может быть полезной для преподавателей и студентов старших курсов технических университетов.

УДК 621.31(03)
ББК 31.2я2

ISBN 978-966-8449-25-3 (Общий)
ISBN 978-966-8449-27-7 (Ч. 2)

© В. Н. Клименко, А. И. Мазур,
А. И. Сигал, 2011
© ИПЦ АЛКОН НАН Украины,
оформление, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	11
Глава 1. ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ – СХЕМЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ	21
1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ГТУ	21
1.1. Реализация видоизмененного цикла Брайтона	21
1.2. Оптимальные параметры цикла ГТУ	28
1.3. Сложные циклы ГТУ	31
2. ТИПОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ГТУ	38
3. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС И КОНСТРУКЦИЯ ТУРБОМАШИН	43
3.1. Течение газа в проточной части осевых турбомашин	44
3.2. Особенности работы осевых турбомашин	51
3.2.1. <i>Осевой компрессор</i>	51
3.2.2. <i>Газовая турбина</i>	66
3.3. Конструкция элементов осевых турбомашин	80
4. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГТУ	104
4.1. Работа и конструкции камер сгорания современных ГТУ	104
4.2. Охлаждаемые лопатки газовых турбин	124
5. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ГТУ	137
5.1. Статические характеристики ГТУ	137
5.2. Влияние параметров наружного воздуха на показатели ГТУ	147
5.3. Системы автоматического регулирования и защиты ГТУ	154
6. ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ГТУ	157
6.1. Фильтры для циклового воздуха	160
6.2. Охлаждение и подогрев засасываемого воздуха	167
7. ГЛУШЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА ГТУ	168
Литература	174

Глава 2. ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ГТУ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ВЕДУЩИХ МИРОВЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ	176
1. ПРИМЕНЕНИЕ ГТУ В ЭНЕРГЕТИКЕ И НА ТРАНСПОРТЕ ГАЗА В БЫВШЕМ СССР	176
2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГТУ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	184
2.1. ГТУ производства АО «Авиадвигатель»	184
2.2. ГТУ производства ОАО «НПО «Сатурн» – АО «Рыбинские моторы»	191
2.3. ГТУ производства СНТК им. Н. Д. Кузнецова	196
2.4. ГТУ, выпускаемые другими производителями	203
3. ГТУ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ УКРАИНСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	218

3.1. ГТУ производства ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект».....	218
3.2. ГТУ производства ОАО «Мотор Сич» и ГП «Ивченко-Прогресс».....	230
3.3. ГТУ производства АО «Турбоатом»	238
4. ГТУ ВЕДУЩИХ МИРОВЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ.....	240
4.1. Общие сведения о зарубежных ГТУ малой и средней мощности.....	240
4.2. ГТУ компании Alstom Power	247
4.3. ГТУ компании General Electric (GE).....	250
4.4. ГТУ фирмы Nuovo Pignone (Италия).....	259
4.5. ГТУ фирмы Solar Turbines	269
4.6. ГТУ компании Pratt & Whitney	273
4.7. ГТУ фирмы Kawasaki Heavy Industries (КНИ).....	279
4.8. Турбогенераторные установки с ГТД фирмы Rolls-Royce.....	281
4.9. ГТУ производства фирмы Siemens	287
4.10. ГТУ других зарубежных фирм.....	299
Литература.....	303

Глава 3. КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ ГТУ, ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ.....	307
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ.....	307
2. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ И КОНСТРУКЦИЙ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ.....	321
2.1. Назначение котлов-утилизаторов	321
2.2. Компоновки КУ	323
2.3. Тепловые схемы КУ	326
3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ГТУ	336
3.1. Котел-утилизатор с дожиганием топлива и наддувом воздуха	336
3.2. Прямоточные котлы-утилизаторы	339
4. ОСОБЕННОСТИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ПАРОВЫХ КУ.....	348
4.1. Исходные положения	348
4.2. Тепловой расчет котла-утилизатора	350
4.3. К определению поверхностей теплообмена	355
5. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ГТУ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ.....	358
5.1. Паровой котел-утилизатор с дожиганием для ГТУ «Урал-6000»	359
5.2. Котел-утилизатор для приводной ГТУ мощностью 10 МВт.....	360
5.3. КУ завода «Красный котельщик» для ГТУ мощностью 4–25 МВт	363
5.4. Паровой КУ двух давлений для ГТЭ-110	367

5.5. Котлы-утилизаторы компании Alstom Power/Energeticke systemy	373
5.6. Котлы-утилизаторы фирмы Standardkessel	377
5.7. Паровые котлы-утилизаторы украинского производства.....	382
6. ВОДОГРЕЙНЫЕ КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ГТУ	388
7. КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	395
7.1. Водотрубные КУ зарубежных фирм.....	395
7.2. Жаротрубные котлы-утилизаторы фирмы Viessmann	402
7.3. Котлы-утилизаторы Черноморского судостроительного завода для судовых дизельных двигателей	408
8. КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ....	414
8.1. Взаимосвязь конструкций КУ и характеристик отходящих газов печей	414
8.2. Характеристики и конструкции газотрубных КУ	417
8.3. Водотрубные змеевиковые КУ	422
Литература.....	425

Глава 4. ГАЗОТУРБИННЫЕ ТЭЦ СБРОСНОЙ И УТИЛИЗАЦИОННОЙ СХЕМ	427
1. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ КОТЕЛЬНЫХ И ТЭЦ.....	427
1.1. Условия осуществления ГТУ-надстроек.....	427
1.2. Тепловые схемы модернизации отопительных котельных	429
1.3. ГТУ-надстройки при модернизации ТЭЦ.....	434
2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГТУ-НАДСТРОЕК СБРОСНОЙ СХЕМЫ.....	436
2.1. Схемы газовых трактов между ГТУ и котлом	436
2.2. Две разновидности сжигания топлива в сбросных схемах	440
2.3. Топливная эффективность ГТУ-надстроек действующих котельных	445
2.4. Варианты размещения ГТУ в котельной.....	449
3. ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРА ГТУ ДЛЯ НАДСТРОЙКИ ПАРОВЫХ И ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ ПО СБРОСНОЙ СХЕМЕ.....	450
3.1. Основные расчетные соотношения.....	451
3.2. ГТУ-надстройки для водогрейных котлов повышенной теплопроизводительности	454
4. ТОПЛИВНАЯ ЭКОНОМИЧНОСТЬ СБРОСНОЙ СХЕМЫ ГТУ-ВОДОГРЕЙНЫЙ КОТЕЛ НА ЧАСТИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ.....	460
5. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ГТУ-НАДСТРОЙКИ ДЛЯ РАЙОННОЙ КОТЕЛЬНОЙ.....	466
5.1. Структура и режимы работы когенерационной установки	466
5.2. Основные технические решения	470

6. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ГТУ + ПАРОВОЙ КОТЕЛ» ...	476
7. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ НАДСТРОЙКА ПРОМЫШЛЕННОЙ КОТЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ И ПАРОВОЙ ТУРБИНАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ.....	480
8. ГАЗОТУРБИННЫЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ УТИЛИЗАЦИОННОЙ СХЕМЫ	491
8.1. Общие положения.....	491
8.2. Расчет тепловой схемы отопительной ГТУ-ТЭЦ.....	497
8.3. Расчет тепловой схемы промышленно-отопительной ГТУ-ТЭЦ	501
9. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОВУЮ ЭКОНОМИЧНОСТЬ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЭЦ.....	507
10. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ГТУ-ТЭЦ.....	512
10.1. Влияние температуры наружного воздуха.....	512
10.2. Работа промышленной ГТУ-ТЭЦ на частичных электрических нагрузках	516
11. ВЫБОР ЧИСЛА СТУПЕНЕЙ ДАВЛЕНИЯ В КУП ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ГТУ-ТЭЦ.....	521
12. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ГТУ-ТЭЦ.....	527
12.1. Энергоблоки «ГТУ+КУ» на площадках котельных	527
12.2. Энергоблоки «ГТУ+КУ» на площадках действующих ТЭЦ....	537
13. О ВОЗМОЖНОСТИ ЭКОНОМИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ОТОПИТЕЛЬНОЙ ГТУ-ТЭЦ С ТЕПЛОВЫМ НАСОСОМ	544
Литература.....	549

Глава 5. ТИПЫ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПГУ.

БИНАРНЫЕ ПГУ-ТЭЦ.....	552
1. ТИПЫ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК.....	552
2. СТЕПЕНЬ БИНАРНОСТИ ПГУ	564
3. ТЕПЛОФИКАЦИОННЫЕ ПГУ – ТИПОВЫЕ ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ И ИХ СИСТЕМНАЯ ЭКОНОМИЧНОСТЬ	571
3.1. Общая характеристика энергетических и теплофикационных ПГУ	571
3.2. Бинарные ПГУ-надстройки при реконструкции ТЭЦ	578
3.3. Оценка топливной экономичности ПГУ-ТЭЦ, работающей в системе теплоэнергоснабжения	582
4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ПГУ-ТЭЦ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ.....	589
5. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ПГУ НА НОМИНАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ.....	603
5.1. Методические основы расчета	603

5.2. Расчет процесса расширения пара в паровой турбине.....	608
5.3. Пример расчета тепловой схемы двухконтурной ПГУ.....	612
6. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРИРУЕМОГО В КУ ПАРА НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПГУ	619
6.1. ПГУ с одноконтурным КУ.....	619
6.2. ПГУ с двухконтурным КУ.....	625
7. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПГУ НА ЧАСТИЧНЫХ НАГРУЗКАХ	629
8. ПГУ, ОБРАЗОВАННЫЕ ПАРОТУРБИНЫМИ НАДСТРОЙКАМИ ГТУ-ПРИВОДОВ	642
9. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПГУ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ	653
10. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОЩНЫХ ПГУ С НАИВЫСШЕЙ ЭКОНОМИЧНОСТЬЮ.....	662
11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ КОНДЕНСАЦИОННЫХ И ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПГУ	670
11.1. Характеристики энергетических ПГУ на конденсационном режиме	670
11.2. Расчет показателей экономичности теплофикационных ПГУ....	675
Литература.....	678

Глава 6. ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ СО СТЕПЕНЬЮ БИНАРНОСТИ $\beta^0 < 1$. ПГУ ДРУГИХ ТИПОВ.....	681
1. ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ СБРОСНОЙ СХЕМЫ.....	681
2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПГУ СБРОСНОЙ СХЕМЫ НА БАЗЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭНЕРГООБЛОКОВ	687
2.1. Технологические аспекты.....	687
2.2. Выбор ГТУ для сбросной схемы.....	693
2.3. Блок ПГУ(с) как надстройка для модернизации действующих ТЭС	698
3. ПАРОГАЗОВЫЕ ТЭЦ СБРОСНОЙ СХЕМЫ.....	701
4. ПГУ-ТЭЦ С КОТЛАМИ-УТИЛИЗАТОРАМИ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СЖИГАНИЕМ ТОПЛИВА (СТЕПЕНЬ БИНАРНОСТИ $\beta^0 < 1$).....	709
5. ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПГУ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ФОРСИРОВАНИИ ПАРОВОГО ЦИКЛА ЗА СЧЕТ ДОЖИГАНИЯ ПЕРЕД КУ	722
6. УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СДТ.....	736
7. СОСТАВНЫЕ (ДВУХКОТЛОВЫЕ) ПГУ	745
7.1. ПГУ с параллельной схемой работы (ПСР).....	746
7.2. Двухпоточная параллельная схема ПГУ.....	753
7.3. ПГУ с полузависимой схемой работы.....	758
8. ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	762

9. ПГУ СО СМЕШЕНИЕМ РАБОЧИХ ТЕЛ.....	771
9.1. ПГУ типа STIG	771
9.2. ПГУ с впрыском пара в ГТУ, регенерацией воды из парогазового потока на выходе КУ и возвращением ее в цикл («Водолей»).....	774
9.3. Теплофикационные ПГУ типа «Водолей» с камерой дожигания	784
Литература.....	788

Перечень ZOOM-страниц

1. Помпаж: автоколебания расхода воздуха в компрессоре	35
2. Бороскоп обслуживает ГТУ	59
3. Одновальная энергетическая ГТУ мощностью 226 МВт фирмы General Electric	119
4. Измерение мощности промышленных ГТД.....	163
5. Сделано в Украине (внешние виды некоторых типов газотурбинных приводов).....	190
6. Измерение шума от работающих ГТУ.....	221
7. Промохлаждение циклового воздуха в ГТУ LM6000 Sprint.....	257
8. ПГУ Stag 107F на ТЭС Честерфилд	353
9. Измерение вредных выбросов ГТУ.....	397
10. Промышленная ГТУ-ТЭЦ на основе FT8.....	457
11. ГТУ-ТЭЦ мощностью 108 МВт на НПЗ в г. Баку	505
12. ПГУ-ТЭЦ мощностью 142 МВт в г. Рига.....	526
13. Использование низкокалорийного газа на промышленной ПГУ-ТЭЦ	583
14. Сухие градирни системы Геллера.....	595
15. Промышленная ПГУ-ТЭЦ мощностью 50 МВт фирмы Kawasaki....	633
16. Одновальная ПГУ фирмы Siemens.....	669
17. Паровые турбины малой мощности модульной конструкции	691
18. ПГУ с полузависимой схемой, работающая на угле и газе	731
19. Многотопливная отопительная ТЭЦ с $\text{Кит} = 94\%$	769
20. Об авторах	789