Г.И. Жихар

Котельные установки тепловых электростанций

Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений
высшего образования
по специальностям
«Тепловые электрические станции»,
«Паротурбинные установки атомных
электрических станций»

Минск
«Вышэйшая школа»
2015

УДК 621.182:621.311.22(075.8)
ББК 31.37я73
Ж 75

Р е ц е н з е н т ы : кафедра энергосбережения, гидравлики и теплотехники Белорусского государственного технологического университета (доктор технических наук, профессор *В.И. Володин*); профессор кафедры ППС Белорусского государственного аграрного технического университета доктор технических наук, профессор энергетики и электротехники *В.И. Русан*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

ISBN 978-985-06-2554-0

© Жихар Г.И., 2015
© Оформление. УП «Издательство “Вышэйшая школа”», 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Процесс сжигания в топочных устройствах энергетических котлов связан с подготовкой топлива и воздуха к сжиганию и сопровождается сопутствующими явлениями. Например, при сжигании твердые топлива подвергаются сушке и размолу, а воздух, применяемый как окислитель, – высокому нагреву. Сопутствующими процессами, в частности, являются шлакование топочной камеры и образование на конвективных поверхностях нагрева связанных отложений, а при сжигании мазутов – коррозия экранных поверхностей. Образование токсичных оксидов азота наблюдается при сжигании любого вида топлива.

Основная направленность данного учебного пособия состоит в раскрытии и анализе рабочих процессов, протекающих в энергетических котлах при сжигании топлива, что соответствует характеру подготовки инженеров-теплоэнергетиков как специалистов эксплуатационно-наладочного профиля.

Рассмотрены энергетические топлива и их технические характеристики, подготовка топлива к сжиганию и эффективность использования теплоты топлива в паровых котлах.

В учебном пособии последовательно освещаются общие вопросы физико-химических явлений сложного процесса горения топлива, дается описание различных способов сжигания энергетических топлив.

Вопросы организации топочных процессов и сжигания топлива рассматриваются с позиции теории горения и турбулентных струй. Такой подход позволяет разрабатывать более перспективные технологические методы камерного сжигания энергетических топлив и более совершенные топочные устройства с учетом физико-химических свойств топлив и их минеральных примесей, а также требуемой высокой интенсивности сжигания и теплопередачи в топочной камере при высокой надежности и экономичности работы котлов энергетических блоков тепловых электростанций. Большое внимание уделено организации сжигания топлива и конструкции топочных устройств, мероприятиям по снижению вредных выбросов оксидов азота в окружающую среду режимными способами.

В учебном пособии рассматриваются процессы, происходящие на внешней стороне поверхностей нагрева, т.е. механизм образования отложений и их очистка, абразивный износ конвективных поверхностей нагрева и коррозия поверхностей нагрева. Приводятся основные параметры современных энергетических и водогрейных котлов большой мощности, а также описание котлов с кипящим слоем.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры «Тепловые электрические станции» БНТУ за оказанную помощь при оформлении рукописи учебного пособия.

ВВЕДЕНИЕ

Основными тепловыми агрегатами паротурбинной ТЭС являются паровой котел и паровая турбина. Паровой котел представляет собой системы поверхностей нагрева для производства пара из непрерывно поступающей в него воды путем использования теплоты, выделяющейся при сжигании топлива, которое подается в топку вместе с необходимым для горения воздухом. Поступающую в паровой котел воду называют питательной водой. Она подогревается до температуры насыщения – испаряется, а выделившийся из кипящей (котловой) воды насыщенный пар перегревается.

При сжигании топлива образуются продукты сгорания, которые в поверхностях нагрева отдают теплоту воде и пару. После поверхностей нагрева продукты сгорания при относительно низкой температуре удаляются из котла через дымовую трубу в атмосферу. На электростанциях большой мощности дымовые трубы выполняют высотой 200–300 м и больше, чтобы уменьшить местные концентрации загрязняющих веществ в воздухе.

В результате горения твердого топлива остаются зола и шлак, которые также удаляются из агрегата. Полученный в котле перегретый пар поступает в турбину, где его тепловая энергия превращается в механическую, передаваемую валу турбины. С последним связан электрический генератор, превращающий механическую энергию в электрическую. Отработанный пар из турбины направляют в конденсатор, в котором он охлаждается водой какого-либо природного (река, озеро, пруд, море) или искусственного (градирня) источника и конденсируется.

На рис. В.1 показана котельная установка с барабанным паровым котлом при сжигании твердого топлива.

Котельная установка – совокупность парового котла и вспомогательного оборудования, обеспечивающего его работу. В ее состав кроме парового котла входят оборудование топливоприготовления, тягодутьевая установка и устройства золоулавливания газовоздушного тракта котла, питательные насосы и регулирующие устройства питательного тракта, электродвигатели и системы управления и защиты парового котла.

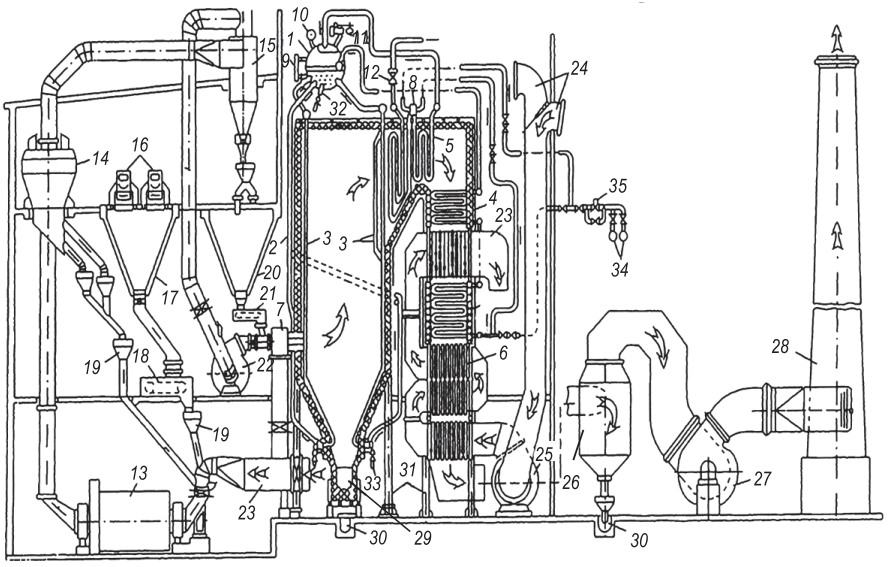

Рис. В.1. Котельная установка с барабанным паровым котлом при сжигании твердого топлива:
1 – барабан; *2* – опускные трубы из барабана; *3* – экранные подъемные трубы; *4* – экономайзер; *5* – пароперегреватель; *6* – воздухоподогреватель; *7* – горелочное устройство; *8* – пароохладитель; *9* – указатель уровня воды; *10* – манометр; *11* – предохранительный клапан; *12* – главная паровая задвижка; *13* – углеразмольная шаровая барабанная мельница; *14* – сепаратор пыли; *15* – пылевой циклон; *16* – транспортер сырого угля; *17* – бункер сырого угля; *18* – питатель сырого угля; *19* – клапан для пропуска угля и пыли; *20* – бункер пыли; *21* – регулятор подачи пыли; *22* – мельничный вентилятор; *23* – короб горячего воздуха; *24* – воздухозаборник; *25* – дутьевой ветилятор; *26* – скруберный золоуловитель; *27* – дымосос; *28* – дымовая труба; *29* – шлакоприемник; *30* – канал шлако- или золоуловителя; *31* – колонны каркаса котла; *32* – непрерывная продувка из барабана; *33* – продувка нижних коллекторов поверхностей нагрева; *34* – трубопровод питательной воды; *35* – питательный регулирующий клапан

Рядом с котлом располагаются система пылеприготовления из поступающего на станцию кускового топлива, тягодутьевая установка, обеспечивающая подачу воздуха в котел и отвод продуктов сгорания после их очистки в дымовую трубу. К обслуживанию котельной установки относят питательные насосы, подающие воду в котел, которые по технологической схеме расположены в турбинном отделении. На рисунке этот тракт начинается с питательных магистралей, пришедших из турбинного отделения. К котельной установке относится также система дренажей коллекторов и непрерывной продувки котла с оборудованием для использования теплоты этих потоков (сепараторы, теплообменники).

Топливо сжигается во взвешенном состоянии в большом объеме топочной камеры. Ее стены экранированы одним рядом плотно расположенных труб, внутри которых вверх в барабан поступают кипящая вода и насыщенный пар высокого давления. Далее насыщенный пар идет в пароперегреватель, состоящий из большого количества змеевиковых труб диаметром 32–42 мм, образующих два змеевиковых пакета, после чего – в главный паропровод и направляется в турбину.

Продукты сгорания на выходе из перегревателя при температуре около 700 °С омывают змеевиковые трубы поверхности экономайзера. Нагрев воздуха, поступающего в горелки топки, происходит в трубчатом воздухоподогревателе, где обеспечено перекрестное движение воздуха по отношению к газам. Он состоит из множества вертикальных труб диаметром 40 мм, внутри которых движутся горячие газы, а снаружи между трубами в поперечном направлении перемещается воздух.

Продукты сгорания после воздухоподогревателя называют уходящими газами.

Котел для сжигания твердого топлива имеет в нижней части топки устройство для удаления шлаков, образующихся в зоне ядра горящего факела. Это устройство называется холодной воронкой. При сжигании газа и мазута такой проблемы нет, и нижняя часть топки имеет горизонтальный под, выложенный огнеупорным материалом.

Обмуровка стен топочной камеры и газоходов данного котла крепится к специальному каркасу котла, который принимает на себя также массу металла всех поверхностей нагрева, коллекторов и барабана.

ГЛАВА 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО И ЕГО КЛАССИФИКАЦИЯ

1.1. Виды топлива и его состав

Энергетическое топливо – горючие вещества, которые экономически целесообразно использовать для получения в промышленных целях больших количеств теплоты. Его основными видами являются органические топлива: угли, торф, горючие сланцы, древесина, продукты переработки нефти (мазута), природный газ.

Угли ископаемые – твердое горючее полезное ископаемое растительного происхождения. Характеристики и состав твердого топлива, в том числе и выход летучих веществ, спекаемость кокса, оказывают сильное влияние на процесс горения угля. С увеличением выхода летучих веществ и содержания в них более реакционноспособных газов воспламенение топлива становится легче, а кокс, благодаря большой пористости, получается более реакционноспособным. В соответствии с существующей классификацией (ГОСТ 25543) ископаемые угли подразделяются на три вида в зависимости от основных генетических признаков (табл. 1.1), в качестве которых рассматриваются: средний показатель отражения витринита R_o, теплота сгорания влажной беззольной массы Q_s^{af} и выход летучих веществ на сухую беззольную массу V^{daf}.

Таблица 1.1. **Основные показатели качества углей**

Вид угля	Средний показатель отражения витринита, R_o	Теплота сгорания влажной беззольной массы Q_s^{af}, кДж/кг	Выход летучих веществ на сухую беззольную массу, V^{daf}, %
Бурый уголь	Менее 0,6	Менее 24	–
Каменный уголь	0,4–2,59	24 и более	8 и более
Антрацит	2,20 и более	–	Менее 8

В зависимости от технологических свойств бурые угли, каменные угли и антрациты объединяются в технологические марки, группы и подгруппы.

Бурые угли в зависимости от величины максимальной влагоемкости на беззольное топливо W_{max}^{af} делятся на три группы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО И ЕГО КЛАССИФИКАЦИЯ 8

1.1. Виды топлива и его состав 8
1.2. Химический состав топлива 18
1.3. Теплота сгорания топлива 23
1.4. Условное топливо и приведенные характеристики 29
1.5. Технические характеристики твердого топлива 30
1.5.1. Выход летучих веществ и свойства твердого горючего остатка 30
1.5.2. Минеральные примеси топлива 32
1.5.3. Влага твердого топлива 37
1.5.4. Технологические показатели влажности топлива 38
1.6. Технические характеристики мазута 40
1.7. Технические характеристики природного газа 48

Глава 2. ПОДГОТОВКА ТОПЛИВА К СЖИГАНИЮ В КАМЕРНЫХ ТОПКАХ 51

2.1. Подготовка к сжиганию твердого топлива 51
2.1.1. Общие положения 51
2.1.2. Удаление из топлива посторонних включений 52
2.1.2.1. Удаление из топлива магнитных металлических предметов 52
2.1.2.2. Удаление из топлива древесных включений 55
2.1.2.3. Удаление из топлива колчедана 56
2.1.2.4. Грохоты 58
2.1.3. Дробление топлива. 60
2.1.3.1. Схемы дробления 60
2.1.3.2. Валковые дробилки 61
2.1.3.3. Молотковые дробилки 65
2.1.4. Свойства и характеристики угольной пыли 67
2.1.4.1. Тонкость размола и зерновая характеристика пыли 67
2.1.4.2. Поверхность пыли 74
2.1.4.3. Плотность пыли 75
2.1.4.4. Влажность пыли 77
2.1.4.5. Взрываемость пыли 78
2.1.4.6. Абразивность топлива 81
2.1.5. Размол топлива 84
2.1.5.1. Коэффициент размолоспособности топлива 85
2.1.5.2. Оптимальная степень размола 87
2.1.6. Конструкции мельниц для размола топлива 89
2.1.6.1. Шаровые барабанные мельницы 89
2.1.6.2. Молотковые мельницы 99

2.1.6.3. Среднеходные мельницы 103
2.1.6.4. Мельницы-вентиляторы 107
2.1.7. Системы приготовления пыли 110
2.1.7.1. Индивидуальные системы приготовления пыли . . . 110
2.1.7.2. Центральная схема пылеприготовления 115
2.1.8. Элементы систем пылеприготовления 118
2.1.8.1. Сепараторы 118
2.1.8.2. Циклоны 126
2.1.8.3. Мигалки 130
2.1.8.4. Пылепитатели 131
2.1.9. Выбор системы пылеприготовления и типа мельниц . . . 134
2.1.10. Взрывы угольной пыли в пылеприготовительных установках и меры для их предотвращения 138
2.2. Подготовка к сжиганию мазута и природного газа 140
2.2.1. Подготовка к сжиганию мазута 140
2.2.2. Подготовка к сжиганию газообразного топлива 142

Глава 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ 145

3.1. Кинетика химических реакций горения 145
3.2. Диссоциация продуктов горения и ее влияние на температуру горения 149
3.3. Скорость химических реакций 151
3.4. Влияние температуры и давления на скорость химических реакций 153
3.5. Цепные реакции. 157
3.6. Кинетическая и диффузионная области горения 160
3.7. Аэродинамические особенности свободной турбулентной струи 164
3.8. Процессы воспламенения и распространения пламени 166
3.8.1. Самовоспламенение твердого топлива 171
3.8.2. Вынужденное воспламенение (техническое зажигание) 174
3.8.3. Концентрационные границы зажигания 174
3.8.4. Нормальная скорость распространения пламени 176
3.9. Турбулентное диффузионное горение газа 180
3.10. Смешанный принцип сжигания газа 184
3.11. Интенсификация сжигания газообразного топлива 187
3.12. Горение жидкого топлива 190
3.13. Горение твердого топлива 197

Глава 4. ТЕПЛООБМЕН В КОТЕЛЬНОМ АГРЕГАТЕ 206

4.1. Особенности теплообмена в топке котла 206
4.2. Расчет суммарного теплообмена в топке котла 211
4.3. Лучистый теплообмен в газоходах котла 224
4.4. Конвективный теплообмен в газоходах котла 227

Глава 5. ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА 232

5.1. Теоретически необходимое количество воздуха 232
5.2. Теоретические объемы продуктов сгорания 233

5.3. Действительные объемы продуктов сгорания 235
5.4. Определение коэффициента избытка воздуха 237
5.5. Энтальпия продуктов сгорания 240

Глава 6. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА . . . 242

6.1. Тепловой баланс парового котла 242
6.2. Анализ тепловых потерь 247
6.2.1. Потери теплоты с уходящими газами 247
6.2.2. Потеря теплоты с химическим недожогом топлива 251
6.2.3. Потеря теплоты с механическим недожогом топлива . . . 253
6.2.4. Потеря теплоты от наружного охлаждения 257
6.2.5. Потеря с физической теплотой шлаков 259
6.2.6. Оптимизация коэффициента избытка воздуха в топке котла по сумме тепловых потерь 260

Глава 7. ТОПОЧНЫЕ КАМЕРЫ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ 262

7.1. Основные характеристики камерных топок 262
7.2. Пылеугольные горелки 266
7.2.1. Вихревые горелки 267
7.2.2. Прямоточные горелки 275
7.2.3. Комбинированные пылеугольные горелки 280
7.2.4. Фронтальная компоновка горелок 285
7.2.5. Встречная компоновка горелок 288
7.2.6. Встречно-смещенная компоновка горелок 289
7.2.7. Тангенциальная компоновка горелок 291
7.3. Камерные топки с твердым шлакоудалением 293
7.3.1. Топки с молотковыми мельницами 298
7.3.2. Топки с мельницами-вентиляторами 303
7.3.3. Топки с пылеконцентратором 305
7.3.4. Вихревые топки 307
7.4. Топки с жидким шлакоудалением 310
7.4.1. Циклонные топки 321
7.4.2. Топочное оборудование 331

Глава 8. ТОПОЧНЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗА И МАЗУТА В ПАРОВЫХ КОТЛАХ 339

8.1. Конструктивные схемы газомазутных топок 339
8.2. Газомазутные топки 344
8.3. Мазутные форсунки 350
8.4. Газомазутные горелки 364
8.5. Расчет газовых горелок 381
8.6. Эксплуатация газомазутных топок 385
8.7. Топки для газообразного топлива 387
8.8. Эксплуатация газовых топок 391
8.9. Эксплуатация пылегазовых топок 394

8.10. Снижение выбросов оксидов азота в окружающую среду режимными методами 395

Глава 9. ПРОЦЕССЫ НА ВНЕШНЕЙ СТОРОНЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА 405

9.1. Загрязнения поверхностей нагрева летучей золой 405
9.2. Механизм шлакообразования и его предупреждение 413
9.3. Износ поверхностей нагрева летучей золой 417
9.4. Коррозия поверхностей нагрева со стороны греющих газов . . . 428
9.4.1. Высокотемпературная коррозия 428
9.4.2. Низкотемпературная коррозия 430
9.4.3. Защита воздухоподогревателей от низкотемпературной коррозии 440
9.5. Очистка поверхностей нагрева котлов 448
9.5.1. Выбор обдувочного агента 448
9.5.2. Выдвижные обдувочные аппараты 449
9.5.3. Стационарные обдувочные устройства 456
9.5.4. Очистка топочных экранов водой 459
9.5.5. Вибрационные устройства 460
9.5.6. Дробеструйные устройства 461
9.5.7. Устройства для обдувки регенеративных воздухоподогревателей 466
9.5.8. Обмывка регенеративных воздухоподогревателей 468
9.5.9. Очистка регенеративных воздухоподогревателей нагревом продуктами сгорания 470
9.5.10. Импульсная очистка регенеративных воздухоподогревателей 471

Глава 10. КОТЛЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ 473

10.1. Основные определения и классификация котлов 473
10.2. Стальные водогрейные котлы 487
10.3. Котлы-утилизаторы 495
10.4. Котлы с кипящим слоем 500

ЛИТЕРАТУРА 517

Жихар, Г. И.

Ж 75 Котельные установки тепловых электростанций : учеб. пособие / Г.И. Жихар. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 523 с. : ил.

ISBN 978-985-06-2554-0.

В учебном пособии приведены сведения по энергетическим топливам, их свойствам и расчетам продуктов сгорания, а также по эффективности использования теплоты топлива. Рассмотрены процессы подготовки твердых топлив к сжиганию в пылевидном состоянии. Изложены основные положения современной теории топочных процессов.

Освещаются физические процессы в топке и на внешней стороне поверхностей нагрева котла. Подробно рассмотрены способы сжигания различных топлив, конструкции горелок и топочных устройств. Приведены технические характеристики современных мощных паровых и водогрейных котлов, а также котлов с кипящим слоем.

Для студентов учреждений высшего образования теплоэнергетических специальностей, а также для инженеров-теплоэнергетиков, работающих в области эксплуатации котлов.

УДК 621.182:621.311.22(075.8)
ББК 31.37я73

Учебное издание

Жихар Георгий Иосифович

КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Учебное пособие

Редакторы *Е.Н. Шульганова, Е.З. Липень*
Художественный редактор *Т.В. Шабунько*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Корректор *Е.З. Липень*
Компьютерная верстка *И.В. Войцехович*

Подписано в печать 12.11.2015. Формат 84×108/32. Бумага офсетная.
Гарнитура «Times New Roman». Офсетная печать.
Усл. печ. л. 27,72. Уч.-изд. л. 32,7. Тираж 600 экз. Заказ 2250.

Республиканское унитарное предприятие
«Издательство "Вышэйшая школа"».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.
Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.
e-mail: market@vshph.com http://vshph.com

Открытое акционерное общество «Типография "Победа"».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/38 от 29.01.2014.
Ул. Тавлая, 11, 222310, Молодечно.

Для заметок

Для заметок

Для заметок