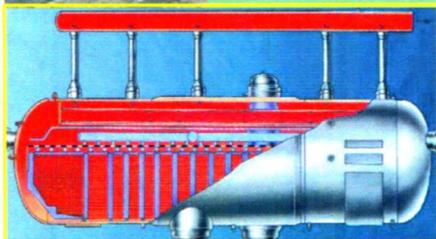


621.311  
С 56



# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ

И ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ,  
ПРОЦЕССОВ, КОНСТРУКЦИЙ  
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС, ТЭС  
И ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ



Монография

Под редакцией  
доктора техн. наук,  
проф. А. В. Ефимова

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«Харьковский политехнический институт»

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
МОДЕЛЕЙ, ПРОЦЕССОВ, КОНСТРУКЦИЙ  
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС, ТЭС  
И ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ**

Монография

**Под редакцией доктора технических наук, профессора  
А. В. Ефимова**

Х а р ь к о в  
Підручник НТУ «ХПІ»  
2 0 1 3

УДК 621.311.4

ББК 31.27

С 56

Рецензенты :

*Г. Н. Письменный*, д-р техн. наук, проф., декан теплоэнергетического факультета, заведующий кафедрой атомных электростанций и инженерной теплофизики НТУ Украины «Киевский политехнический институт»;

*А. С. Мазуренко*, д-р техн. наук, проф., директор института энергетики и компьютерно-интегрированных систем управления, заведующий кафедрой тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий Одесского национального политехнического университета;

*О. Н. Зайцев*, д-р техн. наук, проф., заведу ющий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Национальной академии природоохранного и курортного строительства.

Авторский коллектив :

*А. В. Ефимов, Л. В. Гончаренко, Т. В. Потанина, В. Л. Каверцев, Е. Д. Меньшикова, А. Л. Гончаренко, Т. А. Гаркуша, Т. А. Есипенко, Л. Молль, А. М. аль-Тувайни*

Рекомендовано к печати решением Ученого совета Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (протокол № 6 от 05.07.2013 г.)

У монографії наведено методи, моделі і підходи для вдосконалення і оптимізації процесів, конструкцій і режимів роботи енергетичного устаткування АЕС, ТЕС і опалювальних котельнь. Монографія призначена для наукових співробітників та інженерів, які працюють в галузях ядерної і теплової енергетики, технічної теплофізики, промислової теплоенергетики, теплопостачання, а також для викладачів та аспірантів різних технічних спеціальностей, пов'язаних з цими галузями знань.

**Совершенствование и оптимизация моделей, процессов, конструкций и режимов работы энергетического оборудования АЭС, ТЭС и отопительных котельных / под ред. А. В. Ефимова.** – Харьков : Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2013. —376 с. - На рус. яз.

ISBN 978-966-2426-84-7

В монографіи представлены методы, модели и подходы для совершенствования и оптимизации процессов, конструкций и режимов работы энергетического оборудования АЭС, ТЭС и отопительных котельных. Монография предназначена для научных сотрудников и инженеров, которые работают в областях ядерной и тепловой энергетики, технической теплофизики, промышленной теплоэнергетики, теплоснабжения, а также для преподавателей и аспирантов разных технических специальностей, связанных с этими областями знаний.

Ил. 61 Табл. 26. Библиогр : 290 назв

УДК 621.311.4

ББК 31.27

ISBN 978-966-2426-84-7

© А. В. Ефимов, 2013

© Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2013

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	9
Глава 1	
<b>Методы и подходы к моделированию, оптимизации параметров и диагностике оборудования энергоблоков электростанций</b> .....	15
1.1. Основные методические положения расчетов и оптимизации параметров оборудования энергоблоков электростанций методами математического моделирования .....	15
1.2. Оценка эффективности тепловых схем энергоблоков электростанций по параметрам состояния и надежности оборудования.....	19
1.3. Идентификация математических моделей оборудования энергоблоков электростанций в процессе параметрической диагностики.....	26
1.4. Применение методов интервальной статистики для диагностики параметров состояния оборудования энергоблоков электростанций.....	30
Глава 2	
<b>Анализ существующих методов, моделей и подходов, применяемых для оптимального распределения нагрузок между энергоблоками электростанций, их преимущества и недостатки</b> .....	39
2.1. Методологические подходы к решению задачи управления распределением нагрузок между энергоблоками электростанций.....	41
2.2. Математические модели систем и оборудования энергоблоков электростанций, применяемые для решения задач оптимизации режимов эксплуатации.....	52
2.2.1. Математические модели парогенерирующих установок АЭС и их вспомогательного оборудования.....	52
2.2.2. Математические модели паротурбинных установок АЭС и ТЭС.....	58
2.2.3. Математические модели теплообменного оборудования систем регенерации, конденсации и теплофикации энергоблоков АЭС и ТЭС.....	62
2.3. Перспективные пути решения задачи оптимального распределения нагрузок между энергоблоками электростанций.....	65

## Глава 3

### **Разработка и совершенствование математических моделей**

#### **энергетического оборудования и систем энергоблоков АЭС и ТЭС..... 70**

- 3.1. Описание конструкции и математическая модель горизонтального парогенератора типа ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР..... 70
  - 3.1.1. Описание конструкций парогенератора ПГВ-1000 и его модификаций..... 70
  - 3.1.2. Уравнения теплового баланса и теплопередачи в парогенераторе..... 79
  - 3.1.3. Термодинамические и теплофизические свойства теплоносителя и рабочего вещества, теплопроводность материалов стенок труб парогенератора..... 81
  - 3.1.4. Коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи теплоносителей парогенератора..... 82
  - 3.1.5. Гидравлические характеристики парогенератора..... 83
  - 3.1.6. Конструктивные характеристики парогенератора..... 88
- 3.2. Методика, алгоритм и программа расчета горизонтального парогенератора типа ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР..... 89
- 3.3. Математическая модель системы регенерации энергоблоков АЭС и ТЭС..... 95
- 3.4. Математическая модель системы конденсации энергоблоков АЭС и ТЭС..... 100
- 3.5. Математическая модель котла-утилизатора для паро-газотурбинных установок ТЭС..... 105
- 3.6. Математическая модель линзовых компенсаторов трубопроводных систем энергоблоков АЭС и ТЭС..... 111

## Глава 4

### **Имитационная модель энергоблока АЭС с ВВЭР-1000..... 120**

- 4.1. Технические характеристики систем, оборудования и технологических процессов энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000..... 121
- 4.2. Имитационная модель энергоблока АЭС с ВВЭР-1000..... 123
- 4.3. Автоматизированный комплекс программ для моделирования режимов работы энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000..... 131

## **Глава 5**

### **Анализ влияния изменения параметров технологических процессов в энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 на эффективность их работы..... 141**

5.1. Анализ влияния изменения параметров технологических процессов в горизонтальных парогенераторах типа ПГВ-1000 на их производительность.....	143
5.1.1. Зависимость относительной паропроизводительности парогенератора типа ПГВ-1000 от температуры питательной воды.....	144
5.1.2. Зависимость относительной паропроизводительности парогенератора типа ПГВ-1000 от температуры теплоносителя на входе в парогенератор.....	147
5.1.3. Зависимость относительной паропроизводительности парогенератора типа ПГВ-1000 от давления рабочего вещества.....	149
5.1.4. Зависимость относительной паропроизводительности парогенератора типа ПГВ-1000 от давления теплоносителя.....	152
5.1.5. Многофакторный эксперимент на имитационной модели парогенератора типа ПГВ-1000.....	154
5.2. Интегральные эксплуатационные характеристики энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000.....	166

## **Глава 6**

### **Совершенствование градиентных методов оптимизации для решения задачи распределения нагрузок между энергоблоками АЭС..... 173**

6.1. Применение оптимизационного метода проекции градиента для решения задачи оптимального распределения нагрузок между энергоблоками АЭС.....	174
6.2. Использование математических моделей и оптимизационных процедур с целью повышения среднеэксплуатационной тепловой экономичности энергоблоков АЭС.....	182

## **Глава 7**

### **Современные технологии глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках, их проблемы и пути решения..... 193**

7.1. Эффективность технологий глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках.....	193
7.2. Особенности процессов глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках.....	198

7.3. Проблемы разработки теплоутилизационных технологий и анализ технико-экономических и экологических характеристик конденсационных теплообменных аппаратов разных типов.....	202
7.3.1. Характеристики контактных и контактно-поверхностных теплообменных аппаратов.....	204
7.3.2. Характеристики поверхностных теплообменных аппаратов, состоящих из оребренных труб.....	207
7.3.3. Характеристики теплообменных аппаратов, состоящих из тепловых труб и термосифонов.....	209
7.3.4. Характеристики пластинчатых теплообменных аппаратов.....	210
7.3.5. Характеристики регенеративных теплообменных аппаратов с промежуточным теплоносителем.....	211
7.3.6. Анализ качества воды и конденсата, получаемых в конденсационных теплообменных аппаратах.....	213
7.3.7. Способы обеспечения надежности газоотводящего тракта и дымовой трубы при глубоком охлаждении продуктов сгорания топлива в котельных установках.....	215
7.3.8. Методы тепловых расчетов конденсационных теплообменных аппаратов.....	217
7.4. Перспективные пути решения теоретических и технологических проблем глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках.....	221

## Глава 8

<b>Математическая модель системы «котел -теплоутилизаторы».....</b>	<b>227</b>
8.1. Формирование исходных данных модели.....	233
8.2. Метод расчета объемов и влагосодержаний продуктов сгорания топлива.....	234
8.3. Метод расчета температур точки росы, горячего воздуха и шарообразного теплоносителя.....	237
8.4. Метод расчета энтальпий продуктов сгорания топлива и воздуха.....	240
8.5. Метод расчета коэффициента избытка воздуха и относительной влажности смеси уходящих из теплоутилизаторов продуктов сгорания топлива и горячего воздуха.....	240
8.6. Тепловые и аэродинамические расчеты системы «котел - теплоутилизаторы» и ее элементов.....	241

## Глава 9

<b>Математическая модель конденсационного воздухоподогревателя с циркулирующим шарообразным промежуточным теплоносителем.....</b>	<b>254</b>
9.1. Формирование исходных данных модели.....	256
9.2. Методы и подходы к секционированию поверхности теплообмена на функциональные зоны.....	256
9.3. Моделирование теплового расчета.....	259
9.3.1. Метод составления теплового баланса.....	259
9.3.2. Метод расчета живых сечений для прохода газов и воздуха.....	260
9.3.3. Метод расчета теплообмена в конденсационной зоне.....	262
9.3.4. Метод расчета теплообмена в «сухой» и воздушной зонах.....	266
9.3.5. Метод расчета площади поверхности теплообмена.....	269
9.3.6. Метод определения массы шарообразного теплоносителя и распределение ее по зонам конденсационного воздухоподогревателя.....	269
9.3.7. Методы расчета толщин шарообразных слоев и их аэродинамических характеристик по зонам конденсационного воздухоподогревателя.....	271
9.3.8. Метод расчета коэффициентов диффузии.....	273

## Глава 10

<b>Математическая модель конденсационного теплообменного аппарата поверхностного типа.....</b>	<b>281</b>
10.1. Формирование исходных данных модели.....	281
10.2. Выбор типа теплообменного аппарата в качестве объекта моделирования.....	283
10.3. Метод определения расхода воды и температур ее нагрева.....	286
10.4. Метод расчета удельных тепловых и массовых потоков, температур на границе раздела фаз и стенки поверхности теплообмена.....	287
10.5. Метод определения теплотехнических характеристик конденсационного теплообменного аппарата.....	297
10.6. Сравнение расчетных характеристик конденсационного теплообменного аппарата с предварительно принятыми.....	299

## **Глава 11**

### **Разработка и совершенствование конструкций поверхностных конденсационных аппаратов для замкнутой теплоэнергетической системы «котел — теплоутилизаторы».....**

11.1. Тепловой расчет системы «котел - теплоутилизаторы».....	302
11.1.1. Выбор исходных данных.....	302
11.1.2. Теплотехнические характеристики системы «котел - теплоутилизаторы».....	304
11.2. Разработка конструкции воздухоподогревателя конденсационного типа с шарообразным промежуточным теплоносителем.....	307
11.2.1. Конденсационный воздухоподогреватель дробепоточного типа.....	308
11.2.2. Конденсационный воздухоподогреватель вращающегося типа.....	314
11.3. Разработка конструкции воздухоподогревателя пластинчатого типа.....	318
11.4. Разработка конструкции конденсационного теплообменного аппарата.....	327
11.5. Разработка замкнутой теплоэнергетической системы «котел - теплоутилизаторы» на основе водогрейного котла ТПВ-200.....	343
11.6. Разработка замкнутой теплоэнергетической системы «котел - теплоутилизаторы» на основе котла паропроизводительностью 70 т/ч.....	345
11.7. Обобщенные результаты научных исследований по проблемам технологий глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в котельных установках.....	347
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>351</b>