

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ  
МОДЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ



А.Р. Аветисян  
А.Ф. Пащенко  
Ф.Ф. Пащенко  
Г.А. Пикина  
Г.А. Филиппов

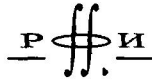
# ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Под общей редакцией  
Г.А. Филиппова и Ф.Ф. Пащенко



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2013

УДК 519.86; 621.398;  
621.039  
ББК 22  
Т 34



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 12-08-07128,  
не подлежит продаже*

Авторский коллектив:

Аветисян А.Р., Пашенко А.Ф., Пашенко Ф.Ф., Пикина Г.А.,  
Филиппов Г.А.

**Теплогидравлические модели оборудования электрических станций /**

Под общ. ред. Г. А. Филиппова, Ф. Ф. Пашенко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 448 с. — ISBN 978-5-9221-1518-6.

Книга посвящена экспериментальным, аналитическим и вычислительным методам построения моделей технологических процессов и оборудования тепловых и атомных электростанций и содержит систематизированный материал литературных источников и результатов исследований, выполненных авторами. Значительная часть книги посвящена математическому описанию теплогидравлических процессов 1-го и 2-го контуров и оборудования АЭС: рассмотрены методы моделирования ядерных энергетических реакторов, парогенерирующих устройств и паровых турбин АЭС.

Описаны эмпирические методы и рекуррентные алгоритмы моделирования промышленных объектов; приведены примеры идентификации реальных энергетических объектов; анализируются проблемы точности моделей и планирование экспериментов для обоснования их адекватности.

Книга ориентирована на инженеров, проектировщиков и научных работников, занимающихся анализом и построением математических моделей энергетического оборудования и систем, а также на студентов старших курсов и аспирантов технических университетов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	8
<b>Глава 1. Тепловые схемы и аппараты ТЭС и АЭС как объекты моделирования . . . . .</b>	<b>14</b>
1.1. Тепловые схемы ТЭС с общим паропроводом и блочного типа . . . . .	14
1.2. Основное оборудование ТЭС . . . . .	16
1.3. Тепловые схемы АЭС . . . . .	25
1.4. Основное оборудование АЭС . . . . .	28
Список литературы . . . . .	31
<b>Глава 2. Основы теории аналитических моделей . . . . .</b>	<b>33</b>
2.1. Классификация аналитических моделей . . . . .	33
2.2. Способы представления моделей . . . . .	35
2.3. Этапы создания аналитических моделей . . . . .	37
2.4. Уравнения основных законов физики в моделях с распределенными параметрами . . . . .	39
2.5. Модели различной степени приближения . . . . .	43
2.5.1. Модели статического приближения (статические модели) (44).	
2.5.2. Модели линейного приближения (линейные модели) (44).	
2.5.3. Модели точечного приближения (СП <sub>1</sub> модели) (46).	
2.5.4. Модели многоточечного приближения (СП <sub>n</sub> модели) (47).	
2.6. Динамические характеристики моделей тепловых процессов потока . . . . .	49
2.6.1. Динамические характеристики РП модели потока (49).	
2.6.2. Динамические характеристики точечной СП модели (52).	
2.7. Характеристики моделей тепловых процессов стенки труб . . . . .	55
2.7.1. Статические характеристики РП модели стенки (55).	
2.7.2. Динамические характеристики РП модели плоской стенки (57). 2.7.3. Динамические характеристики точечной модели стенки (60). 2.7.4. Сравнение моделей различной степени приближения (61).	
Список литературы . . . . .	63

<b>Глава 3. Статистическое моделирование систем . . . . .</b>	<b>65</b>
3.1. Общие вопросы моделирования . . . . .	65
3.2. Классификация моделей . . . . .	67
3.3. Задача идентификации: постановка и основные подходы. . . . .	73
3.4. Регрессионные методы идентификации . . . . .	81
3.5. Оценивание параметров нелинейных моделей . . . . .	89
3.6. Сглаживающие фильтры . . . . .	91
3.6.1. Сглаживатели на основе ортогональных разложений (91).	
3.6.2. Ядерное сглаживание (93). 3.6.3. Оценки $k$ -ближайших соседей (95).	
3.6.4. Суперсглаживатель (97). 3.6.5. Сглаживающие фильтры на основе сплайнов (99).	
3.7. Робастные сглаживатели. . . . .	101
3.8. Другие виды сглаживателей . . . . .	104
3.9. Оценка весовой функции объекта методом наименьших квадратов	105
3.10. Некорректность задачи идентификации и регуляризация решения	109
3.11. Виды тестовых сигналов для определения временных характеристик . . . . .	111
3.12. Идентификация автоматизированных объектов . . . . .	115
3.13. Особенности идентификации неавтоматизированных объектов. . .	116
3.14. Методы оценивания параметров и состояний объектов управления	122
3.15. Косвенные методы оценки математического ожидания и дисперсии	131
3.16. Методы, использующие информацию о длительности выбросов . .	135
3.17. Косвенные методы оценки корреляционной функции и спектральной плотности . . . . .	139
Список литературы . . . . .	142
<b>Глава 4. Численные методы оценивания параметров модели . . . .</b>	<b>146</b>
4.1. Адаптивные алгоритмы в задаче моделирования . . . . .	146
4.1.1. Рекуррентный метод наименьших квадратов (152).	
4.2. Проекционные алгоритмы. Алгоритм Качмажа . . . . .	156
4.2.1. Сходимость алгоритма Качмажа (158). 4.2.2. Скорость сходимости алгоритма (158). 4.2.3. Сходимость при случайных входах (159). 4.2.4. Влияние корреляции на скорость сходимости (160). 4.2.5. Влияние математических ожиданий и случайных помех на скорость сходимости (160).	
4.3. Обобщенные адаптивные алгоритмы идентификации . . . . .	161
4.4. Адаптивная идентификация объектов в замкнутых системах. . . .	168
4.4.1. Объект исследования (168). 4.4.2. Особенности идентификации замкнутых систем (170). 4.4.3. Сведение задачи текущей идентификации к задаче идентификации при зависимых входах (172). 4.4.4. Сходимость алгоритма стохастической аппроксимации при идентификации замкнутых систем (174). 4.4.5. Имита-	

ционное моделирование адаптивных алгоритмов в замкнутом контуре (177).	
4.5. Моделирование процессов идентификации и управления технологическими объектами . . . . .	180
4.5.1. Моделирование режима идентификации (180).	
4.6. Теплогидравлическая модель активной зоны реактора для целей управления энергораспределением . . . . .	187
4.6.1. Моделирование активной зоны реактора (187). 4.6.2. Идентификатор — предиктор состояния (189). 4.6.3. Численные результаты моделирования активной зоны (192).	
Список литературы . . . . .	195
<b>Глава 5. Математическое моделирование парокапельных турбулентных потоков в трансзвуковых соплах . . . . .</b>	<b>199</b>
5.1. Постановка задачи . . . . .	199
5.2. Теоретическая формулировка . . . . .	200
5.2.1. Уравнения движения и энергии двухфазной парокапельной среды (200). 5.2.2. Скорость нуклеации и ее осреднение (201). 5.2.3. Скорость конденсации или испарения (206). 5.2.4. Ядро коагуляции (207). 5.2.5. Эволюция спектра капель по размерам (209). 5.2.6. Модель турбулентности (215).	
5.3. Результаты моделирования течения пара в трансзвуковых соплах. . . . .	220
5.3.1. Расчеты в газодинамическом (нетурбулентном) приближении (220). 5.3.2. Влияние турбулентности на стационарную спонтанную конденсацию водяного пара (225).	
5.4. Влияние ПАВ на течение спонтанно конденсирующегося пара в трансзвуковых соплах . . . . .	231
Список литературы . . . . .	239
<b>Глава 6. Модели теплообменников с распределенными и сосредоточенными параметрами . . . . .</b>	<b>244</b>
6.1. Обобщенная математическая модель теплообменника. . . . .	244
6.2. Методы решения обобщенной модели . . . . .	248
6.3. Модели статике теплообменников. . . . .	251
6.3.1. Распределенная статическая модель конвективного теплообменника с однофазными теплоносителями (252). 6.3.2. Модель статике конвективного теплообменника с наружным теплоносителем на линии насыщения (256). 6.3.3. Распределенная статическая модель радиационного теплообменника (257).	
6.4. Линейные РП модели динамики конвективного теплообменника с однофазными теплоносителями . . . . .	258
6.4.1. Линейная модель прямоточного теплообменника с распределенными параметрами всех сред (РП-РП-РП модель) (259). 6.4.2. Линейная модель прямоточного теплообменника с точечной моделью стенки (РП-СП-РП модель) (263). 6.4.3. Линейная модель противоточного теплообменника с точечной моделью стенки (РП-СП-РП модель) (265). 6.4.4. Линейная модель конвективно-	

го теплообменника с точечной моделью наружного теплоносителя и стенки (СП-СП-РП модель) (270). 6.4.5. Линейная модель конвективного теплообменника с независимым обогревом и точечной моделью стенки (НО-СП-РП модель) (274).	
6.5. Линейные РП модели динамики конвективного теплообменника с наружным теплоносителем на линии насыщения. . . . .	277
6.6. Линейные РП модели динамики радиационного теплообменника . .	279
6.7. Линейные СП модели динамики конвективного теплообменника с однофазными теплоносителями . . . . .	282
6.7.1. Точечная модель КТО с однофазными теплоносителями (282). 6.7.2. Многоточечные модели КТО с однофазными теплоносителями (284).	
6.8. Линейные СП модели динамики конвективного теплообменника с наружным теплоносителем на линии насыщения. . . . .	291
6.8.1. Точечная модель конвективного теплообменника с наружным теплоносителем на линии насыщения (291). 6.8.2. Многоточечная модель конвективного теплообменника с наружным теплоносителем на линии насыщения (292).	
6.9. Линейные СП модели динамики радиационного теплообменника . .	295
6.9.1. Точечная модель радиационного теплообменника (295). 6.9.2. Многоточечная модель радиационного теплообменника (296).	
Список литературы . . . . .	298
<b>Глава 7. Расчет динамических характеристик конвективных поверхностей котлов . . . . .</b>	<b>301</b>
7.1. Расчет динамических характеристик прямоточных теплообменников	303
7.2. Расчет динамических характеристик противоточных теплообменников. . . . .	310
7.3. Влияние параметрических допущений на точность моделей конвективных теплообменников. . . . .	313
7.3.1. Влияние изменения теплоемкости внутреннего теплоносителя на точность модели (314). 7.3.2. Влияние изменения коэффициента теплоотдачи внутреннего теплоносителя на точность модели (318). 7.3.3. Влияние допущений о малости постоянных времени на точность модели (321).	
7.4. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных моделей пароперегревателя котла ТПП-210 . . . . .	322
7.5. Исследование моделей различной степени приближения в задаче синтеза систем автоматического регулирования. . . . .	328
7.5.1. Получение передаточной функции РП модели основного канала с $\alpha_2 = \text{var}$ (330). 7.5.2. Получение передаточных функций СП моделей основного канала с $\alpha_2 = \text{var}$ (332). 7.5.3. Сравнительный анализ частотных свойств моделей (339). 7.5.4. Расчет двухконтурной системы регулирования (341).	
Список литературы . . . . .	342

<b>Глава 8. Модели ядерных энергетических реакторов и парогенераторов</b> . . . . .	344
8.1. Физические основы и модели кинетики реактора. . . . .	344
8.2. Динамические характеристики реактора на малой мощности. . . . .	348
8.3. Физические основы и модели динамики реактора с мощностным коэффициентом реактивности . . . . .	351
8.3.1. Модели динамики реактора ВВЭР, работающего в энергетическом диапазоне мощности (353). 8.3.2. Динамические характеристики модели реактора ВВЭР с мощностным коэффициентом реактивности (361). 8.3.3. Расчет комплексных частотных характеристик модели реактора ВВЭР-440 с мощностным коэффициентом реактивности (364).	
8.4. Модели динамики реактора с температурными коэффициентами реактивности. . . . .	371
8.4.1. Динамические характеристики модели реактора ВВЭР с температурными коэффициентами реактивности (372). 8.4.2. Расчет комплексных частотных характеристик реактора ВВЭР-440 по модели с температурными коэффициентами реактивности (376).	
8.5. Модели тепловых процессов парогенератора . . . . .	379
8.5.1. Модель статки тепловых процессов парогенератора (379). 8.5.2. Линейные модели динамики и характеристики тепловых процессов парогенератора ВВЭР (381).	
Список литературы . . . . .	387
<b>Глава 9. Математические модели парогенерирующих устройств по давлению и уровню</b> . . . . .	388
9.1. Линейная точечная модель барабана котла по уровню . . . . .	388
9.2. Математическая модель по уровню парогенератора блока ВВЭР . .	396
9.3. Математическая модель по давлению . . . . .	401
Список литературы . . . . .	403
<b>Глава 10. Влияние влажности на экономичность паровых турбин</b>	405
10.1. Методика обобщения экспериментальных данных по влиянию влажности на потери в паровых турбинах . . . . .	405
10.2. Экспериментальные исследования характеристик влаги в турбинных решетках и соплах Лаваля методами лазерной диагностики . .	417
10.3. Применение полуторного выхлопа как способа повышения экономичности паровой турбины . . . . .	419
Список литературы . . . . .	431
Приложение 1 . . . . .	432
Приложение 2 . . . . .	433
Приложение 3 . . . . .	434
Приложение 4 . . . . .	436
Приложение 5 . . . . .	437