

В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков,
М. Г. Ладыгичев

**ПЛАВИЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ:
ТЕПЛОТЕХНИКА,
УПРАВЛЕНИЕ
И ЭКОЛОГИЯ**

— СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ —

Книга 2

**В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков,
М. Г. Ладыгичев**

Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология

Справочное издание
в 4-х книгах

Книга 2

Под ред. акад. АИН,
докт. техн. наук, проф. В. Г. Лисиенко



“Теплотехник”
Москва, 2005

УДК 662.9 (083)

ББК 31.391

Л63

Л63 Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология: Справочное издание: В 4-х книгах. Книга 2. / Под ред. В. Г. Лисиенко. — М.: Теплотехник, 2005. — 912 с.

Общий потенциал энергосбережения в российской промышленности достигает 200 млн. т у.т. Крупные резервы энергии могут быть реализованы в металлургии, машиностроении, производстве строительных материалов. Наиболее энергоемкими потребителями в этих отраслях являются многочисленные плавильные агрегаты. Без организации рационального и эффективного использования энергоресурсов при производстве разнообразных конструкционных материалов вряд ли можно решить проблему снижения энергоемкости валового внутреннего продукта, защиты окружающей среды. Именно данной проблеме посвящено настоящее справочное издание, в котором впервые за последние 15–20 лет обобщен опыт повышения эффективности многочисленных плавильных печей с использованием современной методической базы. В связи с энергосберегающей, теплотехнической и экологической направленностью издания подробно освещены важнейшие технические аспекты энергоэффективности: интегрированный энергетический анализ и теория факельных процессов. Приведены характеристики основных типов плавильных агрегатов и варианты компоновок плавильных цехов. Рассмотрены характерные тепломассообменные процессы в наиболее представительной технологической зоне — плавильной ванне, включая гидродинамику и теплоперенос. Освещены основные аспекты энергосберегающих технологий в важнейших типах плавильных агрегатов: сталеплавильное производство и производство ферросплавов, включая альтернативные (внедоменные) процессы получения чугуна и стали, производства цветных металлов, включая автогенные процессы, производство стекла и других материалов, установки с погружным факелом. Отражены вопросы математического моделирования, управления и экспертных систем. Приведены материалы по огнеупорным материалам, системам газоотвода, использованию вторичных энергоресурсов. Даны материалы по характеристикам загрязнений окружающей среды, а также по технологическим решениям по очистке дымовых газов и сточных вод и утилизации твердых отходов.

Ил. 356. Табл. 87. Библиогр. список: 375 назв.

Работа представлена в авторской редакции.

© Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М.,
Ладыгичев М. Г., 2005 г.

ISBN 5-98457-023-8 (Кн. 2, 2-й з-д)

© “Теплотехник”, 2005 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

КНИГА 2

Предисловие	11
Глава 4. Процессы тепло- и массообмена в плавильных ваннах и плавильных агрегатах	13
4.1. Гидрогазодинамика плавильных ванн	15
4.1.1. Комплекс “гидрогазодинамика жидкой ванны”	15
4.1.2. Структура плавильных ванн и роль перемешивания	17
4.1.3. Основные закономерности переноса в ваннах	29
4.1.4. Способы перемешивания плавильных ванн	33
4.1.5. Особенности ванн и печей с барботажным слоем	42
4.2. Характерные тепловые явления в ванне	63
4.2.1. Тепломассообмен в барботажном слое	64
4.2.2. Коэффициент теплоотдачи в фурменной зоне	69
4.2.3. Вопросы тепломассообмена применительно к сталеплавильным ваннам	72
4.3. Особенности процессов плавления в сталеплавильных ваннах и агрегатах ПЖВ	77
4.3.1. Общая характеристика динамики плавления	77
4.3.2. Плавление без науглероживания поверхностного слоя	79
4.3.3. Процессы с науглероживанием поверхностного слоя	82
4.3.4. Особенности плавления порошкообразных материалов	88
4.3.5. Плавление сырьевых материалов в шлаковых расплавах	91
4.4. Особенности теплового баланса (на примере плавильных ванн)	93
4.4.1. Сталеплавильная ванна	93
4.4.2. Агрегат ПЖВ на примере печи РОМЕЛТ	96
4.5. Особенности плавильных ванн и пирометаллургических процессов в цветной металлургии	99
4.5.1. Характеристики автогенных процессов (при плавке на штейн и черновую медь)	100
4.5.2. Характеристики сырьевых материалов	102
4.5.3. Продукты плавки сульфидных материалов	104
4.5.4. Технологические газы и продукты сгорания	107
4.5.5. Особенности тепловой работы печей для автогенной плавки	108
4.5.6. Характеристики массопереноса для пирометаллургических процессов (на примере цветной металлургии)	116
4.6. Особенности работы и расчета печей с барботажным слоем и принципов их конструирования	142
4.6.1. Особенности тепловой и гидрогазодинамической работы печей	142
4.6.2. Методика расчета параметров печей с барботажным слоем	145
4.7. Электролитическое получение алюминия	146
4.8. Процессы нагрева материалов	155
4.8.1. Основные показатели процессов нагрева	155
4.8.2. Расчеты нагрева материала	156

4.8.3. Особенности слоевых сред	167
4.8.4. Теплообмен в движущемся противоточном слое	169
4.8.5. Нагрев кускового материала в неподвижном слое	182
4.8.6. Учет источников тепловыделений при теплообмене в слое	190
4.9. Процессы сушки материалов	192
4.9.1. Использование сушки материалов	192
4.9.2. Основные характеристики сушимого материала	193
4.9.3. Характеристики сушильных агентов	195
4.9.4. Процессы тепло- и массообмена при сушке	199
4.9.5. Расчеты процессов сушки	208
4.10. Особенности ванн стекловаренных печей	216
4.10.1. Особенности и стадии процесса стекловарения	216
4.10.2. Потоки расплава в ваннах стекловаренных печей	223
4.10.3. Тепловые балансы стекловаренных печей	229
4.11. Методы оценки теплопоглощения плавильными ваннами	234
4.11.1. Методы теплотехнических исследований	234
4.11.2. Определение тепловых потоков в рабочем пространстве печей	240
4.12. Исследование тепловой работы и гидродинамики ванн плавильных печей на моделях	249
4.12.1. Исследование конвективной теплоотдачи	249
4.12.2. Модельный комплекс для исследования гидродинамических и физико-химических процессов в ваннах	252
4.13. Список литературы к главе 4	255

Глава 5. Проблемы и подходы к повышению эффективности ваннных плавильных агрегатов	259
5.1. Постановка вопросов эффективности тепловых и технологических процессов ..	259
5.2. Сталеплавильное производство. Изменение структуры производства и факторы воздействия на процессы плавления	260
5.3. Развитие кислородно-конвертерного производства	286
5.4. Дуговые электропечи	289
5.5. Установки электронагрева и плавления	303
5.6. Использование замасленной окалины	313
5.7. Термообработка футерованных ковшей	314
5.8. Отражательная плавка цветных металлов	317
5.9. Развитие автогенных процессов	324
5.10. Электролитическое рафинирование	331
5.11. Производство алюминия	336
5.12. Список литературы к главе 5	340

Глава 6. Альтернативные (внедоменные, внешехтные) методы получения чугуна и ферроникеля	346
6.1. Жидкофазное восстановление. Процесс РОМЕЛТ	347
6.2. Многофункциональный плавильный агрегат ПВЖВ	354
6.3. Комбинированные жидкофазно-газотвердофазные процессы	357

6.3.1. Процесс Корекс и другие процессы	357
6.3.2. Комбинированные восстановительные процессы с прямой плавкой на сталь в электропечи (процесс ЛП-В)	358
6.3.3. Разработка альтернативных комбинированных процессов производства ферроникеля	367
6.3.4. Сопоставление альтернативных бескоксовых процессов	383
6.4. Список литературы к главе 6	385

Глава 7. Сравнительный энергетический и энерго-экологический анализ

сталлургических плавильных процессов	389
7.1. Проблемы энергосбережения в металлургии	389
7.2. Энерго-экологические проблемы и показатели при производстве стали	395
7.3. Энергетические и экологические проблемы металлургии стали производства современных конструкционных материалов	401
7.4. Энергоемкость различных технологических циклов	411
7.5. Роль доли чугуна в шихте и сопоставление энергоемкости различных технологических процессов	413
7.6. Энергоемкость ванадиевых сплавов и сталей	417
7.7. Энергетические проблемы ковшевой металлургии	429
7.8. Энергетический анализ — важный показатель энергосбережения на ММК	431
7.9. Список литературы к главе 7	443

Глава 8. Особенности тепловой работы и эффективного использования

топлива в стекловаренных печах	449
8.1. Особенности технологии и тепловой работы стекловаренных печей	449
8.2. Основные конструкции стекловаренных печей	454
8.2.1. Обзор конструкций	454
8.2.2. Прямоточная рекуперативная печь с двойным сводом	466
8.2.3. Регенеративные печи с поперечным направлением факела	469
8.2.4. Ваннные регенеративные печи с подковообразным направлением движения газов	473
8.2.5. Высокопроизводительный агрегат для плавления базальта	478
8.3. Повышение эффективности использования топлива в стекловаренных печах	483
8.3.1. Подогрев воздуха и использование кислорода	484
8.3.2. Совершенствование сжигания природного газа	486
8.3.3. Разработка конструкции мазутной форсунки с изменяемой длиной факела	493
8.3.4. Конструкция форсунки для сжигания легкого жидкого топлива	500
8.4. Плавильные агрегаты с погружным горением	502
8.5. Регенераторы стекловаренных печей	505
8.6. Список литературы к главе 8	510

Глава 9. Вопросы теплотехнического и компьютерного моделирования,

управления, теплообменного анализа, управления и экспертных систем	513
9.1. Компьютерное моделирование и виртуальные процессы	513

9.2. Теплообмен и математические модели тепловых режимов электродуговых сталеплавильных печей	515
9.2.1. Особенности электрических дуг ЭДП	515
9.2.2. Теплообмен излучением в ДСП	524
9.2.3. Разработки, моделирование и пример конструктивных решений водоохлаждаемых элементов ДСП	555
9.2.4. Компьютерные модели теплообмена при плавке металлизированных окатышей в дуговых сталеплавильных печах	557
9.2.5. Комплексная математическая модель тепловой работы ДСП	570
9.3. Компьютерное моделирование процесса плавления расходоуемого электрода при вакуумном дуговом переплаве титана	572
9.4. Моделирование теплоотдачи от газо-кислородного погружного факела в расплаве	576
9.5. Моделирование процесса центробежной грануляции ферросплавов и модификаторов	579
9.6. Компьютерное моделирование теплообмена в печах автогенной плавки меди ...	586
9.6.1. Моделирование теплообмена в печах кислородной факельной плавки .	587
9.6.2. Теплообмен в печах КФП и сульфидный факел	591
9.6.3. Автогенная плавка Ванюкова в комплексе “печь – котел”	599
9.6.4. Факельно-барботажный агрегат комбинированного автогенного процесса	602
9.6.5. Моделирование гидродинамики и сложного теплообмена в факельных процессах плавки дисперсного сульфидного сырья	604
9.7. Математическое моделирование теплообмена в отражательных печах	613
9.7.1. Зональная компьютерная модель теплообмена в отражательных печах	613
9.7.2. Анализ влияния режимных параметров и схем отопления	618
9.8. Компьютерное математическое моделирование внешнего теплообмена в ваннах стекловаренных печей	635
9.8.1. Задачи моделирования и зонально-факельный метод расчета	635
9.8.2. Теплообмен в рекуперативной стекловаренной печи (алюмоборосиликатное стекло)	639
9.8.3. Распределение топлива по ширине рабочего пространства	651
9.8.4. Регенеративные печи с подковообразным направлением факела	662
9.8.5. Печи с поперечным расположением факела	678
9.9. Компьютерное моделирование радиационно-кондуктивного теплообмена (РКТ) в полупрозрачных средах	703
9.9.1. Область применения полупрозрачных сред и подходы при моделировании	703
9.9.2. Некоторые особенности и физические свойства полупрозрачных сред	705
9.9.3. Моделирование радиационно-кондуктивного теплообмена с фазовым переходом 1 рода	717
9.9.4. Применение зонального метода	732
9.10. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в ваннах стекловаренных печей	745
9.10.1. Методы и алгоритм моделирования	745

9.10.2. Обобщенное основное уравнение моделей	753
9.10.3. Примеры расчетов гидродинамики и температурных полей в ваннах стеклорасплавов	753
9.10.4. Моделирование качества стекла	758
9.11. Моделирование и расчет теплообмена излучением в слое материала	760
9.11.1. Упрощенный метод расчета и экспериментальные данные	761
9.11.2. Теплообмен излучением в слое волокнистого материала	764
9.11.3. Радиационно-кондуктивный теплообмен в слоистом материале	771
9.11.4. Эффективная теплопроводность кирпичной насадки (садки)	779
9.12. Вопросы управления и экспертных систем	783
9.12.1. Компьютерные модели и процессы управления	783
9.12.2. Некоторые современные аспекты управления технологическими процессами, элементы искусственного интеллекта	784
9.12.3. Поточковые динамические характеристики рабочего пространства сталеплавильной печи	793
9.12.4. Способ наладки и контроля тепловой работы плавильной печи	805
9.12.5. Уточненный потоковый метод измерения температуры ванны стекловаренной печи	812
9.12.6. Оценка динамических характеристик параметров процесса плавки свинцовых концентратов	816
9.12.7. Оптимизация электрических и тепловых режимов ДСП и примеры реализации	820
9.12.8. Построение нечеткой управляющей модели процесса Ванюкова	827
9.12.9. Адаптивное уравнение с нечетким лингвистическим регулятором	832
9.12.10. Экспертное управление концентрационным режимом алюминиевого электролизера	842
9.12.11. Экспертная система управления процессом горения в плавильной печи	848
9.12.12. Тренажер экспертной системы управления плавкой в жидкой ванне	850
9.12.13. Новые способы управления процессом плавления в вакуумной дуговой печи	854
9.13. Примеры компьютерных моделей сложных плавильных процессов	866
9.13.1. Статическая модель кислородно-конвертерной плавки	866
9.13.2. Статистические и динамические модели процесса РОМЕЛТ	878
9.13.3. Детерминированные термодинамические (физико-химические) модели управлениями плавильными процессами	882
9.14. Список литературы к главе 9	892

КНИГА 1

Предисловие

Введение

В.1. Методические аспекты

В.2. Характерные технологические и физико-химические (массообменные)

- процессы плавильных ванн на примере металлургических процессов
В.3. Продукты и полупродукты металлургического производства
В.4. Список литературы к Введению

Глава 1. Интегрированный энергетический анализ и проблемы энергоэффективности в приложении к плавильным агрегатам

- 1.1. Основные особенности интегрированного энергетического анализа
- 1.2. Методы определения энергоемкости продукции
- 1.3. Методика полного (сквозного) энергоэкологического анализа
- 1.4. Алгоритм и программное обеспечение полного энергоэкологического анализа
- 1.5. Динамическая энергоемкость продукции предприятий и валового внутреннего продукта
- 1.6. Теория теплообменных эффективностей энерготехнологических процессов
- 1.7. Теплообменный анализ и современные методы математического моделирования
- 1.8. Характерные теплообменные особенности плавильных агрегатов
- 1.9. Список литературы к главе 1

Глава 2. Факельные процессы – теория и расчеты

- 2.1. Роль факельных процессов в плавильных агрегатах и основные характеристики факела
- 2.2. Устойчивость процессов горения и характеристики безопасности
- 2.3. Границы, зоны и длина факела
- 2.4. Радиационные характеристики факела
- 2.5. Положение факела относительно тепловоспринимающей поверхности и кладки
- 2.6. Скоростные и другие аэродинамические характеристики факела
- 2.7. Экологические характеристики факела
- 2.8. Влияние характеристик факела на процессы тепло- и массообмена в рабочем пространстве печей и агрегатов
- 2.9. Особенности горения полидисперсного топлива
- 2.10. Математическое моделирование процессов теплопереноса в полидисперсном потоке
- 2.11. Общие требования к горелочным устройствам и примеры расчетов
- 2.12. Список литературы к главе 2

Глава 3. Общие сведения о плавильных агрегатах

- 3.1. Характеристика основных типов плавильных агрегатов
- 3.2. Историческая справка развития теории и практики энерготехнологических процессов (теории энергосберегающих технологий)
- 3.3. Варианты технологических схем и компоновок металлургических цехов
- 3.4. Конструкции плавильных агрегатов
- 3.5. Печи специального назначения
- 3.6. Оборудование ковшевой металлургии

3.7. Список литературы к главе 3

КНИГА 3

Глава 10. Огнеупорные материалы и их применение в плавильных агрегатах

- 10.1. О направлениях развития огнеупорной промышленности в России и за рубежом
 - 10.1.1. Тенденции в развитии огнеупорной промышленности
 - 10.1.2. Технические возможности основных огнеупорных предприятий России
 - 10.1.3. Особенности развития мировой огнеупорной промышленности
- 10.2. Мартеновские печи
- 10.3. Сталеплавильные конвертеры
- 10.4. Дуговые электросталеплавильные печи
- 10.5. Ферросплавные печи
- 10.6. Индукционные печи
- 10.7. Сталеразливочные ковши, внепечная обработка стали и МНЛЗ
- 10.8. Перечень стандартов и технических условий по огнеупорным изделиям и материалам для сталеплавильных плавильных агрегатов
- 10.9. Некоторые факторы, определяющие стойкость огнеупорной футеровки плавильных агрегатов цветной металлургии
- 10.10. Печи для производства меди
- 10.11. Печи для производства никеля
- 10.12. Печи и установки для производства цинка
- 10.13. Печи для производства свинца
- 10.14. Печи для производства олова
- 10.15. Печи и установки для производства алюминия
- 10.16. Печи и установки для производства магния
- 10.17. Огнеупорные изделия и материалы для печей цветной металлургии
- 10.18. Стекловаренные печи
- 10.19. Список литературы к главе 10

Глава 11. Системы газоотвода плавильных агрегатов

- 11.1. Взаимосвязь технологических и энергетических параметров системы плавильный агрегат–газоотводящий тракт
- 11.2. Газоотводящие тракты мартеновских печей
- 11.3. Газоотводящие тракты кислородных конвертеров
- 11.4. Газоотводящие тракты дуговых сталеплавильных печей
- 11.5. Особенности газоотводящих трактов плавильных печей цветной металлургии
- 11.6. Устройства для эвакуации дымовых газов
- 11.7. Список литературы к главе 11

Глава 12. Вторичные энергоресурсы и теплообменные аппараты

- 12.1. Общие данные
- 12.2. Схемы регенеративного теплообмена
- 12.3. Вторичные энергетические ресурсы

- 12.4. Утилизационные установки цветной металлургии
- 12.5. Конструкции и особенности работы котлов-утилизаторов
- 12.6. Вторичные энергетические ресурсы и когенерация
- 12.7. Об управлении использованием ВЭР
- 12.8. Основы расчета теплообменных аппаратов
- 12.9. Особенности расчетов котлов-утилизаторов
- 12.10. Список литературы к главе 12

Глава 13. Характерные загрязнения окружающей природной среды при работе плавильных агрегатов

- 13.1. О плавильной составляющей металлургической техносферы
- 13.2. Оценка и снижение эколого-экономического ущерба
- 13.3. Экономический ущерб от загрязнения окружающей природной среды (уровень региона)
- 13.4. Список литературы к главе 13

КНИГА 4

Глава 14. Технологические решения очистки дымовых газов

- 14.1. Схемы очистки газовых систем
- 14.2. Основное оборудование для очистки газовых систем
- 14.3. Некоторые общие материалы по газоочисткам
- 14.4. Совершенствование конструкций газоочистных устройств
- 14.5. Список литературы к главе 14

Глава 15. Технологические решения очистки сточных вод

- 15.1. Общие данные
- 15.2. Технологические решения очистки сточных вод
- 15.3. Оборудование систем водонабжения агрегатов металлургических производств
- 15.4. Реагенты, применяемые для обработки воды
- 15.5. Список литературы к главе 15

Глава 16. Утилизация твердых отходов металлургических производств

- 16.1. Общие подходы
- 16.2. Общая классификация отходов
- 16.3. Отходы черной и цветной металлургии
- 16.4. Металлургическая переработка лома и отходов
- 16.5. Лом и скрап черных металлов
- 16.6. Список литературы к главе 16