

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

ПЛАВИЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ:
ТЕПЛОТЕХНИКА,
УПРАВЛЕНИЕ
И ЭКОЛОГИЯ

— СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ —

Книга 1

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

Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология

Справочное издание
в 4-х книгах

Книга 1

Под ред. акад. АИН им. А. М. Прохорова,
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 1. / Под ред. В. Г. Лисиенко. — М.: Теплотехник, 2005. — 768 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, а также утилизации твердых отходов.

Ил. 192. Табл. 189. Библиогр. список: 147 назв.

Работа представлена в авторской редакции.

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

ISBN 5-98457-022-X (Кн. 1, 1-й з-д)

ОГЛАВЛЕНИЕ

КНИГА 1

Предисловие	11
Введение	13
В.1. Методические аспекты	13
В.2. Характерные технологические и физико-химические (массообменные) процессы в плавильных ваннах на примере металлургических процессов	16
В.3. Продукты и полупродукты металлургического производства	22
В.4. Список литературы к Введению	48
Глава 1. Интегрированный энергетический анализ и энерго-экологический и проблемы энергоэффективности в приложении к плавильным агрегатам ..	49
1.1. Основные особенности интегрированного энергетического анализа	49
1.2. Методы определения энергоемкости продукции	52
1.2.1. Развитие методов комплексного анализа затрат топлива и энергии	52
1.2.2. Особенности предлагаемой и развиваемой методики энергетического анализа	54
1.2.3. Технологическое топливное число (структурированная форма)	58
1.2.4. Анализ энергопотребления с использованием технологических топливных чисел	61
1.2.5. Диссипативная форма и методика определения энергоемкости продукции	67
1.2.6. Оценка затрат человеческого труда в энергетическом исчислении	71
1.3. Методика полного (сквозного) энерго-экологического анализа	76
1.3.1. Основные особенности энерго-экологического анализа	76
1.3.2. Структурированная методика экологического анализа	80
1.3.3. Диссипативная методика экологического анализа	84
1.4. Алгоритм и программное обеспечение полного энерго-экологического анализа	87
1.5. Динамическая энергоемкость продукции предприятий и валового внутреннего продукта	97
1.6. Теория тепломассообменных эффективностей энерготехнологических процессов	106
1.6.1. Соотношение полной энергоемкости и удельных расходов топлива с глобальным энергетическим и тепловым КПД	106
1.6.2. Связь теплового КПД и производительности агрегата	108
1.6.3. Тепловой и итоговый физико-химический (массообменный) КПД	110
1.6.4. Обобщенный химико-тепловой КПД	118
1.6.5. Внутренние компоненты КПД: теплообменный и физико-химический (массообменный) КПД	121
1.6.6. Режим тепломассообменного управления (автогенерации) при оценке тепломассообменных КПД	133
1.6.7. Э-И-характеристики и режим теплообменного управления при теплообмене излучением для условий плавления (фазовых переходов)	139

1.6.8. Оптимизация теплового и теплообменного КПД в триадных критериях: энергия, экология, капзатраты	151
1.6.9. Обобщенные таблицы и блок-схема структуры определения теплоемкообменных эффективностей	169
1.6.10. Эксергия и эксергетический КПД	173
1.6.11. Основные приоритеты при использовании интегрированного энергетического анализа	181
1.7. Теплообменный анализ и современные методы математического моделирования	184
1.7.1. Особенности и базовые уравнения моделей процессов теплоемкообмена	185
1.7.2. Модели и методы решения задач сложного теплообмена	195
1.7.3. Метод Монте-Карло для расчета угловых коэффициентов излучения в излучающих средах	213
1.7.4. Обобщенный термодинамический подход — основа детерминированной процедуры построения математической модели объектов с распределенными параметрами	222
1.7.5. Динамический зонально-узловой метод (ДЗУ-метод)	227
1.8. Характерные теплоемкообменные особенности плавильных агрегатов	233
1.8.1. Особенности теплообмена при плавлении	233
1.8.2. Определение и сравнительный анализ Э–И–характеристик и показателей эффективности плавильных агрегатов	239
1.9. Список литературы к главе 1	246
Глава 2. Факельные процессы — теория и расчеты	259
2.1. Роль факельных процессов в плавильных агрегатах и основные характеристики факела	259
2.1.1. Роль факельных процессов	259
2.1.2. Характеристики факела	262
2.2. Устойчивость процессов горения и характеристики безопасности	263
2.2.1. Горение, взрыв и детонация в газовых смесях	263
2.2.2. Условия воспламенения газовых смесей	265
2.2.3. Устойчивость процессов горения	270
2.2.4. Скорость распространения пламени	274
2.2.5. Механизм стабилизации пламени	283
2.2.6. Стабилизация горения в различных промышленных условиях	285
2.3. Границы, зоны и длина факела	290
2.3.1. Газовые факелы	290
2.3.2. Особенности мазутного факела	301
2.3.3. Примеры расчетов параметров и длин факелов и практические рекомендации	309
2.3.4. Факельные аэродинамические характеристики и эталонные длины факелов	315
2.4. Радиационные характеристики факела	317
2.4.1. Газообразные продукты сгорания	317

2.4.2. Сажистые частицы пламени	326
2.4.3. Упрощенная модель спектра излучения для газов и сажи- стых частиц ...	350
2.5. Положение факела относительно тепловоспринимающей поверхности и кладки	356
2.6. Скоростные и другие аэродинамические характеристики факела	359
2.7. Экологические характеристики факела	362
2.8. Влияние характеристик факела на процессы тепло- и массообмена в рабочем пространстве печей и агрегатов	385
2.8.1. Оптическая толщина слоя и настильность факела	385
2.8.2. Длина и светимость факела	390
2.8.3. Сравнение различных схем отопления	396
2.8.4. Тепло- и массообменные процессы на границе факела с поверхностью материала, роль аэродинамических факторов	398
2.9. Особенности горения полидисперсного топлива	400
2.9.1. Традиционные методы расчета горения полидисперсного топлива	400
2.9.2. Статистический метод учета полидисперсности в тепло- и массообменных процессах (горении)	406
2.9.3. Примеры использования статистического подхода	409
2.10. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в полидисперсном потоке	421
2.10.1. Основные уравнения	422
2.10.2. Математическое моделирование сжигания полидисперсного жидкого топлива в потоке	434
2.11. Общие требования к горелочным устройствам и примеры расчетов	441
2.11.1. Выбор типов горелок для газоиспользующих агрегатов	442
2.11.2. Расчеты сопел	444
2.11.3. Расчет мазутных форсунок и газомазутных горелок высокого давления	452
2.11.4. Горелочные устройства и длина факела	464
2.11.5. Расчет и усовершенствование, конструкций реформаторов природного газа для промышленных печей	464
2.12. Список литературы к главе 2	481
Глава 3. Общие сведения о плавильных агрегатах	488
3.1. Характеристика основных типов плавильных агрегатов	488
3.2. Историческая справка развития теории и практики энерготехнологических процессов (теории энергосберегающих технологий)	492
3.2.1. Краткая история развития теории и практики печей	492
3.2.2. Кислородно-конверторный процесс: история создания и развития	496
3.2.3. Хроника развития теории энергосберегающих технологий в рамках Уральской научной школы	500
3.3. Варианты технологических схем и компоновок металлургических цехов	511
3.3.1. Общие положения	511
3.3.2. Технологическая схема сталеплавильных цехов, реализованных до 80-х годов XX века	513

3.3.3. Основные параметры мартеновских цехов	515
3.3.4. Конвертерные цехи	523
3.3.5. Электросталеплавильное производство	541
3.3.6. Краткая характеристика технологических схем машиностроительных предприятий	551
3.3.7. Технологические схемы производства некоторых цветных металлов ..	555
3.3.8. Цехи для производства ферросплавов	576
3.4. Конструкции плавильных агрегатов	587
3.4.1. Плавильные агрегаты черной металлургии	587
3.4.1.1. Мартеновские печи	588
3.4.1.2. Сталеплавильные конвертеры	596
3.4.1.3. Электрические печи	603
3.4.2. Конструкции ферросплавных печей	622
3.4.3. Плавильные агрегаты цветной металлургии	645
3.4.3.1. Общие данные плавильных агрегатов	645
3.4.3.2. Отражательная плавка рудного сырья	646
3.4.3.3. Электропечи цветной металлургии	663
3.4.3.4. Металлотермическая плавка	676
3.4.3.5. Конвертирование сульфидных расплавов	680
3.4.3.6. Фьюмингование и пироселекция	685
3.4.3.7. Автогенные плавки в цветной металлургии	691
3.5. Печи специального назначения	708
3.5.1. Конструкции печей	708
3.5.2. Пример практического использования печей специального назначения	732
3.6. Оборудование ковшевой металлургии	737
3.7. Список литературы к главе 3	746
Заключение	749

КНИГА 2

Глава 4. Процессы тепло- и массообмена в плавильных ваннах и плавильных агрегатах

- 4.1. Гидрогазодинамика плавильных ванн
- 4.2. Характерные тепловые явления в ванне
- 4.3. Особенности процессов плавления в сталеплавильных ваннах и агрегатах ПЖВ
- 4.4. Особенности теплового баланса (на примере плавильных ванн)
- 4.5. Особенности плавильных ванн и пирометаллургических процессов в цветной металлургии
- 4.6. Особенности работы и расчета печей с барботажным слоем и принципов их конструирования
- 4.7. Электролитическое получение алюминия
- 4.8. Процессы нагрева материалов
- 4.9. Процессы сушки материалов
- 4.10. Особенности ванн стекловаренных печей

- 4.11. Методы оценки теплопоглощения плавильными ваннами
- 4.12. Исследование тепловой работы и гидродинамика ванн плавильных печей на моделях
- 4.13. Список литературы к главе 4

Глава 5. Ванные плавильные агрегаты

- 5.1. Сталеплавильное производство. Общие проблемы энергосбережения
- 5.2. Дуговые электропечи
- 5.3. Использование замасленной окалины
- 5.4. Термообработка футерованных ковшей
- 5.5. Отражательная плавка цветных металлов
- 5.6. Автогенные процессы
- 5.7. Электролитическое рафинирование
- 5.8. Производство алюминия
- 5.9. Список литературы к главе 5

Глава 6. Альтернативные (внедоменные) методы получения чугуна и полупродукта

- 6.1. Жидкофазное восстановление. Процесс Ромелт
- 6.2. Многофункциональный плавильный агрегат ПВЖВ
- 6.3. Комбинированные жидкофазно-газотвердофазные восстановительные процессы
- 6.4. Список литературы к главе 6

Глава 7. Сравнительная энергоемкость процессов выплавки стали

- 7.1. Энергоемкость различных технологических циклов
- 7.2. Роль доли чугуна в шихте
- 7.3. Энергоемкость ванадиевых сплавов и сталей
- 7.4. Некоторые проблемы ковшевой металлургии
- 7.5. Список литературы к главе 7

Глава 8. Особенности тепловой работы и эффективного использования топлива в стекловаренных печах

- 8.1. Особенности технологии и тепловой работы стекловаренных печей
- 8.2. Основные конструкции стекловаренных печей
- 8.3. Повышение эффективности использования топлива в стекловаренных печах
- 8.4. Плавильные агрегаты с погружным горением
- 8.5. Список литературы к главе 8

Глава 9. Вопросы теплотехнического и компьютерного моделирования, управления, теплообменного анализа, управления и экспертных систем

- 9.1. Компьютерное моделирование и виртуальные процессы
- 9.2. Теплообмен и математические модели тепловых режимов электродуговых сталеплавильных печей

- 9.3. Компьютерное моделирование процесса плавления расходуемого электрода при вакуумном дуговом переплаве титана
- 9.4. Моделирование теплоотдачи от газо-кислородного погружного факела в расплаве
- 9.5. Моделирование процесса центробежной грануляции ферросплавов и модификаторов
- 9.6. Компьютерное моделирование теплообмена в печах автогенной плавки меди
- 9.7. Математическое моделирование теплообмена в отражательных печах
- 9.8. Компьютерное математическое моделирование внешнего теплообмена в ваннах стекловаренных печей
- 9.9. Компьютерное моделирование радиационно-кондуктивного теплообмена (РКТ) в полупрозрачных средах
- 9.10. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в ваннах стекловаренных печей
- 9.11. Моделирование и расчет теплообмена излучением в слое материала
- 9.12. Вопросы управления и экспертных систем
- 9.13. Примеры компьютерных моделей сложных плавильных процессов
- 9.14. Список литературы к главе 9

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
- Заключение