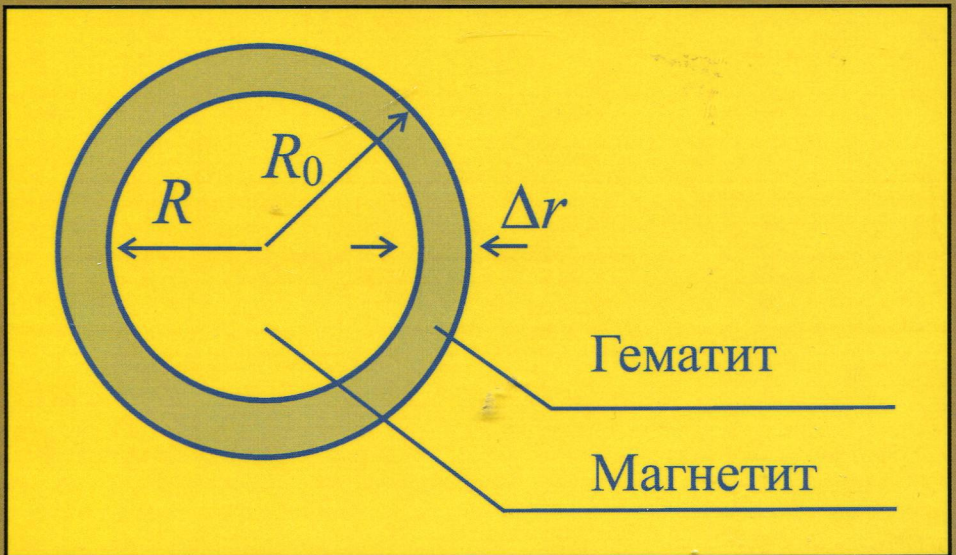


В.М. Абзалов  
В.А. Горбачев  
С.Н. Евстюгин  
В.И. Клейн  
Л.И. Леонтьев  
Б.П. Юрьев

Физико-химические  
и теплотехнические основы  
производства железорудных окатышей



ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие  
ТОРЭКС» («НПВП ТОРЭКС»)

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

**В.М. Абзалов**, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин,  
В.И. Клейн, Л.И. Леонтьев, Б.П. Юрьев

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

*Под редакцией академика РАН Л.И. Леонтьева*

Екатеринбург  
2015

УДК 669.1:622.341.1-182

ББК 34.3

Ф50

Рецензенты: профессор УрФУ, д. т. н. Ю.Г. Ярошенко  
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова  
(филиал МИСИС)

Ф50 **Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / [В.М. Абзалов], В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, Л.И. Леонтьев, Б.П. Юрьев / Под ред. академика РАН Л.И. Леонтьева. – Екатеринбург: МИЦ, 2015. – 335 с.**

ISBN 978-5-9907151-2-7

Рассмотрены основные физико-химические процессы, структура и газодинамика слоя, тепло- и массообмен и теплофизические характеристики железорудных окатышей при их термообработке на обжиговой машине.

Книга предназначена для инженерно-технических работников горно-обогатительных комбинатов, занимающихся вопросами подготовки шихтовых материалов к металлургическому переделу, доменных цехов, а также научно-исследовательских и проектных институтов металлургического профиля. Может быть полезна преподавателям и студентам высших учебных заведений, обучающихся по направлению – металлургия.

Библиограф. 185 назв., 33 табл., 126 рис.

УДК 669.1:622.341.1-182

ББК 34.3

ISBN 978-5-9907151-2-7

© «НПВИ ТОРЭКС», 2015

© УрФУ имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина, 2015

© Авторы, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБЖИГЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	9
1.1. Процесс сушки окатышей.....	11
1.1.1. Формы связи воды и материала.....	13
1.1.2. Перенос воды при сушке влажных материалов.....	14
1.1.3. Сушка отдельного окатыша.....	16
1.1.4. Сушка слоя окатышей.....	28
1.2. Окисление окатышей из магнетитовых концентратов.....	45
1.2.1. Формирование структуры окатышей при окомковании и обжиге.....	47
1.2.2. Диффузия кислорода в порах окатыша.....	64
1.2.3. Механизм и кинетика окисления окатышей.....	69
1.2.3.1. Реакционная зона при окислении окатышей.....	73
1.2.3.2. Кристаллохимическое превращение магнетита в гематит.....	80
1.2.3.3. Исследование процесса окисления окатышей Лебединского ГОКа.....	86
1.2.3.4. Исследование процесса окисления окатышей Качканарского ГОКа.....	95
1.2.4. Влияние температурно-временных условий и состава газовой фазы на физико-химические процессы в окатышах...	105
1.2.4.1. Влияние скорости нагрева на процесс окисления.....	107
1.2.4.2. Зависимость процесса окисления от состава газовой фазы.....	111
1.2.4.3. Влияние пористости окатышей на процесс окисления.....	116
1.3. Процесс декарбонизации окатышей.....	120
1.3.1. Изотермический процесс декарбонизации.....	120
1.3.2. Неизотермический процесс декарбонизации.....	124
1.4. Процесс диссоциации гематита в окатышах.....	127
1.4.1. Механизм диссоциации гематита.....	127
1.4.2. Кинетика диссоциации гематита.....	130
1.5. Термодинамика спекания железорудного окатыша.....	134
1.6. Процессы десульфурации окатышей.....	141
1.6.1. Основные реакции с участием сернистых соединений, протекающие в процессе термообработки окатышей.....	141
1.6.2. Анализ основных реакций с участием сернистых соединений....	142
1.6.3. Использование доломита для повышения степени десульфурации окатышей.....	147
1.6.4. Исследование десульфурации окатышей с различной основностью и минералогическим составом концентрата...	148

1.6.5. Зависимость степени десульфурации окатышей различного состава от кислородного потенциала газовой фазы.....	153
1.6.6. Влияние содержания серы в окатышах на технологию их обжига.....	156
1.6.6.1. Физическая модель слоевого процесса десульфурации.....	156
1.6.6.2. Режим термообработки сернистых окатышей.....	157
1.6.6.3. Особенности десульфурации окатышей для металлизации.....	159
<b>2. ГАЗОДИНАМИКА СЛОЯ ОКАТЫШЕЙ.....</b>	<b>161</b>
2.1. Основные положения теории механики жидкостей и газов.....	162
2.2. Потери энергии при движении потоков.....	176
2.3. Газодинамика плотного слоя.....	190
2.3.1. Геометрия плотного слоя.....	191
2.3.2. Газодинамическое сопротивление плотного слоя.....	195
2.3.3. Газодинамика слоя окатышей.....	202
2.3.3.1. Газодинамические характеристики окатышей.....	202
2.3.3.2. Режим движения газа в слое.....	208
2.3.4. Расчет газодинамического сопротивления слоя окатышей... ..	212
2.3.4.1. Обзор расчетов.....	212
2.3.4.2. Определение порозности слоя окатышей.....	221
2.3.4.3. Определение среднего размера окатышей.....	224
2.3.5. Газодинамическое сопротивление слоя окатышей на обжиговой машине.....	226
2.3.5.1. Газодинамическое сопротивление слоя окатышей с учетом порозности.....	227
2.3.5.2. Порозность слоя окатышей.....	232
<b>3. ТЕПЛОБМЕН В СЛОЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ И ВЛИЯНИЕ НА НЕГО РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ.....</b>	<b>237</b>
3.1. Разработка методов расчета теплообмена в слое железорудных окатышей.....	237
3.1.1. Особенности нагрева слоя магнетитовых офлюсованных окатышей.....	237
3.1.2. Обзор существующих решений по теплообмену в слое... ..	239
3.1.3. Разработка метода расчета теплообмена в слое с применением линейно-ступенчатой аппроксимации граничных условий задачи .....	241
3.1.4. Метод численного расчета теплообмена в слое окатышей с помощью ЭВМ.....	251
3.1.5. Примеры расчета теплообмена в слое окатышей.....	259
3.1.6. Влияние размера железорудных окатышей на интенсивность теплообмена в неподвижном слое.....	262

4. МАССООБМЕН ПРИ ОКИСЛИТЕЛЬНОМ ОБЖИГЕ ОФЛОСОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	268
5. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	283
5.1. Теплоемкость окатышей.....	284
5.1.1. Физическая теплоемкость.....	285
5.1.2. Кажущаяся теплоемкость.....	292
5.2. Коэффициент температуропроводности окатышей.....	299
5.3. Плотность окатышей.....	304
5.4. Коэффициент теплопроводности окатышей.....	305
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	307
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	309
Приложение 1. Концентрация паров воды при 100 % относительной влажности (в газах).....	311
Приложение 2. Физико-химические характеристики концентратов и окатышей.....	313
Приложение 3. Значения термодинамического потенциала ( $\Delta Z_T$ ) реакций процесса десульфурации железорудного сырья.....	314
Приложение 4. Величина $\Delta Z_T$ при окислении и диссоциации сульфидов.....	316
Приложение 5. Величина $\Delta Z_T$ при образовании сульфатов.....	317
Приложение 6. Величина $\Delta Z_T$ при диссоциации сульфатов.....	
Приложение 7. Величина $\Delta Z_T$ при взаимодействии сульфидов с водой.....	318
Приложение 8. Расчетные выражения для определения величины гидравлического сопротивления слоя по данным ряда авторов.....	319
Приложение 9. Пояснения к рис. 2.17.....	321
Приложение 10. Расчетные формулы для определения среднего диаметра окатышей полидисперсного слоя.....	322
Приложение 11. Опытные данные для расчета гидравлических характеристик слоя окатышей.....	323
Приложение 12. К расчету эквивалентной порозности слоя окатышей.....	323
Приложение 13. Исходные данные для расчета гидравлических характеристик слоя окатышей.....	324
Приложение 14. К расчету эквивалентной порозности слоя окатышей на обжиговой машине.....	325
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	326