



Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»)



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

Г. М. Дружинин, И. М. Дистергефт

РЕГЕНЕРАТИВНАЯ ГОРЕЛКА

Справочник

В двух томах

Том 1

*Под общей редакцией доктора технических наук,
профессора Г. М. Дружинина*

Екатеринбург
Агентство Маркетинговых Коммуникаций «День РА»
2019

Контактная информация

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической
теплотехники»

(ОАО «ВНИИМТ»)

620137, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 16

Генеральный директор

Зайнуллин Лик Анварович

Тел. +7 (343) 374-03-80

Email: aup@vniimt.ru

www.vniimt.ru

УДК 669.187.242(035)

ББК 34.303-51-04я22

Д76

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *М. В. Темлянец* (Сибирский государственный индустриальный университет);

д-р техн. наук, проф. *А. Н. Дмитриев* (Институт металлургии Уральского отделения РАН)

Дружинин, Г. М.

Д76 Регенеративная горелка : справочник. В 2 т. Т. 1 / Г. М. Дружинин, И. М. Дистергефт; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. М. Дружинина. — Екатеринбург : АМК «День РА», 2019. — 1128 с.

ISBN

ISBN

Справочник знакомит читателя с одной из самых прогрессивных технологий использования тепла сжигаемого топлива непосредственно в промышленных агрегатах, основанной на применении регенеративных горелочных устройств. Данная технология позволяет не только уменьшить потери тепла с уходящими газами, сократив при этом количество вредных выбросов, но и повысить качество нагрева металла.

В издании впервые представлена в хронологическом порядке подробная информация о развитии регенеративных систем отопления, приведены конструкции, технические характеристики регенеративных горелок, подробно описано их устройство. Рассмотрены варианты изготовления насадок регенераторов, их компоновки с горелками. Особое внимание уделено системам отопления различных тепловых агрегатов на основе регенеративных горелок, их промышленной реализации и эффективности.

Справочник адресован теплотехникам металлургических и машиностроительных заводов, специалистам соответствующих проектных организаций, научным сотрудникам и аспирантам научно-исследовательских и академических институтов, а также студентам металлургических факультетов высших и средних специальных учебных заведений.

УДК 669.187.242(035)

ББК 34.303-51-04я22

ISBN

ISBN

© Дружинин Г. М.,
Дистергефт И. М., 2019

Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники (ОАО «ВНИИМТ»)

620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 16. Тел.: +7 (343) 374-03-80, факс: +7 (343) 374-29-23, aup@vniimt.ru, www.vniimt.ru

Оглавление

ОТ АВТОРОВ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. РЕГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА.....	12
1.1. Использование теплоты дымовых газов в рабочем пространстве печи	12
1.2. Нагрев воздуха горения и промышленные способы его реализации	15
1.3. Экскурс в историю создания и промышленного применения первого поколения регенеративных систем отопления различных агрегатов	18
1.3.1. Особенности и недостатки регенеративных систем отопления печами первого поколения.....	26
1.3.2. Горелки с компактными регенераторами для пламенных печей	29
1.4. Эффективность сжигания топлива с нагретым до высокой температуры воздухом	32
ГЛАВА 2. КОМПАКТНЫЙ РЕГЕНЕРАТОР	36
2.1. Назначение и принцип работы регенератора	36
2.2. Составные части регенератора и требования к его насадке	37
2.3. Материалы и конфигурации элементов для насадки регенератора	39
2.3.1. Стандартный кирпич, монолитные огнеупорные балки	39
2.3.2. Керамические пористые стержни с пазами.....	45
2.3.3. Гранулированный материал.....	46
2.3.4. Шары.....	47
2.3.5. Керамический конструкционный материал сферической формы	50
2.3.6. Тела сферической формы, полусферы	65
2.3.7. Керамические втулки — кольца Рашига и Лессинга	67
2.3.8. «Седла»	69
2.3.9. Тугоплавкие элементы крестообразной формы.....	70
2.3.10. Профилированные листы, плитки.....	70
2.3.11. Тонкостенные металлические или керамические трубки	75
2.3.12. Стальная проволока, сотовидная стальная структура.....	84
2.3.13. Металлокерамические, керамические соты	87
2.3.14. Пористая керамика — керамическая пена	95
2.4. Сравнение характеристик регенеративных насадок из различных элементов	97
2.4.1. Эквивалентный диаметр элементов, удельная площадь поверхности теплообмена, температурная эффективность насадки, коэффициент рекуперации тепла	97

2.4.2. Масса и габаритные размеры насадок	108
2.4.3. Скорость движения газов через насадку.....	113
2.4.4. Распределение температур теплоносителей по насадке регенератора, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи.....	116
2.4.5. Аэродинамическое сопротивление насадки	136
2.4.6. Время переключения потоков теплоносителей	151
2.4.7. Выход насадки на квазистационарное состояние	157
2.4.8. Надежность работы регенератора.....	159
2.4.9. Экономические аспекты при выборе типа насадки.....	160
2.4.10. Конструкции компактных регенераторов	162
ГЛАВА 3. НЕПОДВИЖНЫЙ КОМПАКТНЫЙ РЕГЕНЕРАТОР.....	163
3.1. Насадки однооборотного регенератора.....	165
3.1.1. Насыпная насадка	166
3.1.2. Насадка из тонкостенных трубок	184
3.1.3. Насадка из керамических сот.....	188
3.1.4. Комбинированные виды насадок	204
3.2. Корпус регенератора	206
3.3. Опорно-распределительная решетка	216
3.4. Конфигурация над- и поднасадочных камер	223
3.5. Дополнительные устройства, улучшающие тепловую работу регенератора	236
3.6. Варианты исполнения неподвижных рекуператоров	239
3.6.1. Одновременный нагрев воздуха и топлива	239
3.6.2. Нижний подвод дымовых газов	240
3.6.3. Тангенциальное размещение воздушного патрубка горелки.....	242
3.6.4. Подковообразное движение теплоносителей	243
3.6.5. Регенератор горизонтального типа.....	248
3.6.6. Радиальное и взаимно-перпендикулярное движение теплоносителей	249
3.6.7. Примеры взаимной компоновки регенератора и его составных частей.....	260
3.6.8. Регенератор с эжектором и промежуточным отбором дымовых газов.....	272
3.6.9. Регенератор с регулируемым проходным сечением насадки	274
ГЛАВА 4. ПОДВИЖНЫЙ РЕГЕНЕРАТОР	275
4.1. Регенераторы с вращающейся насадкой — дисковым ротором	277
4.2. Регенератор конструкции Miroslav Stibor и Jaroslav Koten	293
4.3. Регенератор револьверного типа	323
4.4. Регенератор с вращающимся ротором в виде барабана.....	329
4.5. Регенераторы дискового типа с неподвижной насадкой и вращающимися коллекторами	338
4.6. Регенератор с неподвижными насадками, вращающимися патрубками, а также с поворотным устройством внутри корпуса	347
4.7. Регенератор с передвигающейся насадкой	352
4.8. Регенератор с неподвижной насадкой и движущимся в ней теплоносителем	354

ГЛАВА 5. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ НАСАДКИ РЕГЕНЕРАТОРА.....	362
5.1. Очистка неподвижного регенератора с насадкой из корундовых шаров.....	363
5.1.1. Очистка с выгрузкой шаров.....	363
5.1.2. Продувка насадки различными газами.....	387
5.1.3. Использование специальных приспособлений, устройств и режимов сжигания топлива.....	393
5.2. Защита и очистка насадки из керамических сот или пены.....	407
5.3. Очистка регенератора с вращающейся насадкой.....	424
5.4. Калибровка регенераторов.....	433
ГЛАВА 6. СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ ПЕЧЕЙ С РЕГЕНЕРАТИВНЫМИ ГОРЕЛКАМИ.....	434
6.1. Технические требования к переключающим устройствам.....	434
Примеры конструктивного исполнения коммутирующих устройств.....	434
6.2. Тягодутьевые устройства системы отопления.....	452
6.3. Автоматизированная система управления регенеративными горелками.....	454
6.3.1. Автоматизированный запуск печи.....	460
6.3.2. Обеспечение безопасности и аварийное отключение печи.....	461
6.3.3. Обеспечение поочередного переключения регенеративных горелок и их работы.....	465
6.3.4. Обеспечение заданной температуры в печи.....	466
6.3.5. Плановый останов печи.....	466
6.4. Системы отопления печей с регенеративными горелками.....	467
6.4.1. Схема «две горелки» и ее модификации.....	467
6.4.2. Схема «две горелки» с рециркуляцией.....	476
6.4.3. Схема «две горелки» с подогревом воздуха и газа.....	497
6.4.4. Схема «две горелки» с подогревом водяного пара или кислорода.....	507
6.4.5. Схема «две горелки» с использованием вспомогательных устройств.....	512
6.4.6. Система отопления печей с различным количеством пар регенеративных горелок.....	519
6.4.7. Два регенератора для произвольного количества горелок.....	526
6.4.8. Схема «две горелки» с впрыском топлива в печь и подачей топлива в горелку при удалении дымовых газов.....	529
6.4.9. Схема отопления на три или четыре горелки.....	532
6.4.10. Схема с одной горелкой (фурмой) и различным количеством регенераторов.....	535
6.4.11. Система отопления с изменяющимся во времени количеством сжигающих топливо горелок и прерывный режим сжигания топлива.....	542
6.4.12. Схема отопления: три регенератора и несколько горелок.....	544
6.4.13. Комбинированные схемы отопления.....	545
6.4.14. Схемы отопления с удалением дымовых газов в регенераторы, минуя горелки.....	548
6.4.15. Система отопления с вращающимся регенератором.....	561

ГЛАВА 7. СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА В РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛКАХ	563
7.1. Особенности сжигания различных видов топлив	563
7.1.1. Сжигание низкокалорийного газообразного топлива	563
7.1.2. Сжигание твердого топлива	575
7.1.3. Сжигание жидкого топлива	581
7.1.4. Сжигание биотоплива	583
7.2. Сжигание топлива с избытком или недостатком воздуха	586
7.2.1. Сжигание топлива с недостатком воздуха	587
7.2.2. Сжигание топлива с большим избытком воздуха	589
7.3. Эмиссия вредных веществ при сжигании углеводородного топлива	611
7.3.1. Эмиссия оксида и диоксида углерода	612
7.3.2. Эмиссия оксидов азота	613
7.4. Влияние различных режимных и конструктивных параметров на образование NO_x при горении топлива	616
7.4.1. Температура нечного объема и воздуха горения	617
7.4.2. Концентрация кислорода в воздухе горения	621
7.4.3. Коэффициент избытка воздуха	625
7.4.4. Скорости потоков воздуха и топлива, угол их наклона относительно оси горелки	628
7.4.5. Форма воздушно-дымовых каналов и компоновка их на фронтальной части горелки	632
7.4.6. Тепловая мощность горелки и коэффициент загрузки печи	637
7.4.7. Вид и состав топлива	638
7.4.8. Рециркуляция дымовых газов и впрыск воды	640
7.4.9. Компоновка горелок на печи и линейные размеры рабочего пространства	643
7.5. Предельно допустимые нормы концентрации NO_x	646
7.6. Способы снижения выбросов оксидов азота	652
7.6.1. Предварительное подмешивание инертных газов в высококалорийное газообразное топливо или нагретый воздух	655
7.6.2. Ступенчатое (многостадийное) сжигание топлива	656
7.6.3. Рециркуляция дымовых газов	660
7.6.4. Объемное сжигание топлива в рабочем пространстве	664
ГЛАВА 8. ПРИМЕНЕНИЕ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК НА РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ	694
8.1. Экономические аспекты внедрения регенеративных систем отопления	694
8.2. Регенеративное отопление на проходных нагревательных печах	707
8.3. Печи с вращающимся подом и регенеративными горелками	753
8.4. Регенеративная система отопления нагревательных устройств с камерным режимом	768
8.5. Регенеративная система отопления стенов для сушки и разогрева ковшей	838
8.6. Печи с регенеративным отоплением для плавки цветных и черных металлов	861

8.6.1. Печи для плавления алюминия	861
8.6.2. Печи для получения металлического магния	893
8.6.3. Тигельные печи с регенеративными горелками	908
8.6.4. Регенеративное отопление колпаковых печей	935
8.7. Радиационные трубы с регенеративной системой отопления	948
8.7.1. Радиационные трубы с одной прямолинейной ветвью	952
8.7.2. Тупиковые радиационные трубы	961
8.7.3. М-образные радиационные трубы	969
8.7.4. U-образные радиационные трубы	974
8.7.5. W- и P-образные радиационные трубы	988
8.7.6. Радиационные нагреватели различных форм и конструкций	1009
8.8. Регенеративные системы отопления различных технологических агрегатов	1022
8.8.1. Регенеративная печь кипящего слоя	1022
8.8.2. Эндотермический газовый генератор	1028
8.8.3. Обжиговая вращающаяся печь	1032
8.8.4. Зажигательный горн	1037
8.8.5. Агрегаты для нагрева пиролиза углеводородного сырья	1038
8.8.6. Промежуточные ковши в установках непрерывного литья заготовок	1046
8.8.7. Установка для обезвреживания бытовых и промышленных отходов	1053
8.8.8. Регенеративные воздухо- и газонагреватели	1070
8.8.9. Регенеративное сжигание вредных и токсичных летучих органических соединений	1088
8.8.10. Регенеративное отопление паровых котлов	1093

Оглавление второго тома

ОТ АВТОРОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 9. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ГОРЕЛКИ КОМПАНИЙ АНГЛИИ,
США И КАНАДЫ

9.1. Горелки компаний Великобритании

9.2. Горелки компаний США

ГЛАВА 10. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ГОРЕЛКИ КОМПАНИЙ ЯПОНИИ

10.1. Горелки компании Tokyo Gas Co., Ltd.

10.2. Горелки корпорации Nippon Kokan Corporation

10.3. Горелки холдинга JFE Holding

10.4. Горелки компании NGK Insulators, Ltd.

10.5. Горелки холдинга Nippon Furnce Kogy Kaisha Ltd.

10.6. Горелки серии HRS

10.7. Горелки компании Osaka Gas Company Ltd.

10.8. Горелки компании Toho Gas Ltd.

10.9. Горелки компании Yokoi Kikai Kosakusyo Co., Ltd.

10.10. Горелки компаний Chiyoda Corp. и Furnace Techno

10.11. Горелки компании Chugai Ro Kogyo Kaisha Ltd.

10.12. Горелка для сжигания газогенераторного топлива

10.13. Горелки компании Rozai Kogyo Kaisha, Ltd.

10.14. Горелки Toyota Motor Corporation

10.15. Горелки корпорации Sumitomo Metal Industries Ltd.

10.16. Горелки Nippon Steel Corporation

10.17. Горелки корпорации IHI Corp.

10.18. Горелки компании Daido Steel Co., Ltd.

10.19. Горелки компании Sanken Sangyo Co., Ltd.

10.20. Отдельные разработки различных производителей

ГЛАВА 11. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ГОРЕЛКИ КОМПАНИЙ КИТАЯ

11.1. Регенеративные горелки компаний, расположенных в Пекине

11.2. Горелки компаний из административного района Чунцин (Chongqing)

11.3. Горелки компаний г. Аньшань (Anshan)

11.4. Горелки компаний г. Шэньяна (Shenyang)

11.5. Горелки компаний г. Уханя (Wuhan)

11.6. Горелки компаний провинции Хебей (Hebei)

11.7. Горелки компаний г. Шанхая (Shanghai)

11.8. Горелки компаний г. Лояна (Luoyang)

- 11.9. Горелки компаний г. Цзинаня (Jinan)
- 11.10. Горелки компаний г. Цзянина (Jiangyin)
- 11.11. Горелки компаний г. Гуанчжоу (Guangzhou)
- 11.12. Горелки компаний префектуры Уси (Wuxi)
- 11.13. Горелки компаний провинции Шаньдун (Shandong)
- 11.14. Горелки компаний городского округа Фошань (Foshan)
- 11.15. Горелка компании г. Уху (Wuhu) и г. Чэндэ (Chengde)
- 11.16. Горелки компаний г. Таньшаня (Tangshan) и г. Юэяна (Yueyang)
- 11.17. Горелки г. Тяньцзиня (Tianjin)
- 11.18. Горелка компаний провинции Цзянсу (Jiangsu)
- 11.19. Горелки компаний г. Шэньчжэня (Shenzhen) провинции Гуандун
- 11.20. Горелки компаний из провинции Хубэй (Hubei)
- 11.21. Горелки компаний из различных административных районов КНР

ГЛАВА 12. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ГОРЕЛКИ ЮЖНОЙ КОРЕИ

- 12.1. Горелки компаний POSCO и ее подразделения
- 12.2. Горелки компании Kereotec Co., Ltd.
- 12.3. Горелки института Korea Institut Energy Research (KIER)
- 12.4. Горелки различных компаний Южной Кореи

ГЛАВА 13. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ГОРЕЛКИ КОМПАНИЙ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА (ЕС)

- 13.1. Горелки компаний Германии (ФРГ)
- 13.2. Австрийская промышленная группа Andritz Group
- 13.3. Горелки компаний Швейцарии
- 13.4. Деятельность компаний Испании
- 13.5. Горелки компаний Италии
- 13.6. Горелки компаний Франции
- 13.7. Горелка компании Cockerill Maintenance & Ingénierie (CMI) (Бельгия)
- 13.8. Горелки компаний Чехии
- 13.9. Горелки компаний Польши
- 13.10. Горелки компаний Румынии
- 13.11. Горелки компаний Венгрии
- 13.12. Горелки компаний Швеции

ГЛАВА 14. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ГОРЕЛКИ, РАЗРАБОТАННЫЕ В РОССИИ (СССР), УКРАИНЕ И ТАЙВАНЕ

- 14.1. Горелки, созданные в СССР и России
- 14.2. Горелки предприятий Украины
- 14.3. Горелки предприятий Тайваня

Справочное издание

Дружинин Геннадий Михайлович
Дистергефт Игорь Михайлович

РЕГЕНЕРАТИВНАЯ ГОРЕЛКА

Контактная информация

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»
(ОАО «ВНИИМТ»)

620137, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 16

Генеральный директор

Зайнуллин Лик Анварович

Тел. +7 (343) 374-03-80

Email: aup@vniimt.ru

www.vniimt.ru